

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff

**Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-  
Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung sowie  
vor und nach Aufbringen eines konventionellen  
Befestigungskomposits**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Dr. med. Alicia Isabelle Mandl  
aus Düsseldorf

2021

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff

**Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-  
Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung sowie  
vor und nach Aufbringen eines konventionellen  
Befestigungskomposits**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Dr. med. Alicia Isabelle Mandl  
aus Düsseldorf

2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

<b>Berichterstatter:</b>	Prof. Dr. rer. biol. hum. Dipl. Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc.
<b>Mitberichterstatter:</b>	Prof. Dr. Dipl. Ing. Nicoleta Ilie Prof. Dr. Dr. Heinz Kniha
<b>Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:</b>	PD Dr. med. dent. Anja Liebermann, M.Sc.
<b>Dekan:</b>	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel
<b>Tag der mündlichen Prüfung:</b>	26.03.2021

**Hinweis**

Die im nachfolgenden Text genannten Handelsnamen, Waren- und Gebrauchsbezeichnungen sind teilweise patent- und urheberrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises bzw. des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Warennamen handelt.



Für Jonas und Mama.

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Vorwort.....	12
2	Einleitung.....	13
3	Literaturübersicht.....	14
3.1	Einteilung dentaler Keramiken .....	14
3.2	Herstellungsverfahren und Eigenschaften dentaler Silikatkeramiken .....	14
3.3	Mechanische Parameter dentaler Keramiken.....	16
3.3.1	Härteprüfverfahren.....	16
3.3.1.1	Martenshärteparameter .....	16
3.3.1.2	Vickershärte .....	17
3.3.2	Biegefestigkeit .....	18
3.3.2.1	Biaxiale Biegefestigkeit .....	19
3.3.2.2	Dreipunktbiegefestigkeit.....	19
3.3.2.3	Vierpunktbiegefestigkeit.....	21
3.4	Weibull Modul und charakteristische Festigkeit .....	22
3.5	Optische Parameter dentaler Keramiken .....	23
3.5.1	Transluzenz, Opazität und Transparenz.....	23
3.5.2	Farbbestimmung .....	25
3.6	Adhäsive Befestigung .....	27
3.6.1	Traditionelle Zemente und adhäsive Befestigungskomposite .....	27
3.6.2	Vor- und Nachteile.....	27
3.6.3	Konventionelle und selbstadhäsive Befestigungskomposite .....	27
3.6.3.1	Anwendung konventioneller Befestigungskomposite .....	28
3.6.3.2	Selbstadhäsive Befestigungskomposite .....	28
3.6.3.3	Konditionierung der Restauration.....	28
3.7	Beeinflussung der Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen.....	29

3.7.1	Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften durch Alterung	29
3.7.2	Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften durch ein Befestigungskomposit.....	30
4	Zielsetzung der Dissertation .....	32
5	Material und Methoden.....	33
5.1	Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermalen Alterung .....	33
5.1.1	Studiendesign.....	33
5.1.2	Herstellung der Prüfkörper .....	36
5.1.3	Hydrothermale Alterung .....	41
5.1.4	Methoden .....	41
5.1.4.1	Bestimmung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls .....	41
5.1.4.2	Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit .....	44
5.1.4.3	Bestimmung der Transluzenz und der Farbwerte .....	47
5.2	Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken .....	48
5.2.1	Studiendesign.....	48
5.2.2	Herstellung der Prüfkörper .....	49
5.2.3	Aufbringen des Befestigungskomposits .....	49
5.3	Methoden .....	50
5.4	Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken.....	51
5.4.1	Studiendesign.....	51
5.4.2	Herstellung der Prüfkörper .....	52
5.5	Methoden .....	52
6	Statistische Auswertung.....	53
7	Ergebnisse .....	54

7.1	Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermalen Alterung .....	54
7.1.1	Martenshärte und elastischer Eindringmodul .....	54
7.1.1.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	54
7.1.1.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	57
7.1.1.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	58
7.1.2	Biaxiale Biegefestigkeit .....	59
7.1.2.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	60
7.1.2.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	61
7.1.2.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	62
7.1.3	Weibull Modul .....	62
7.1.3.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	62
7.1.3.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	63
7.1.3.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	63
7.1.4	Charakteristische Festigkeit .....	64
7.1.4.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	64
7.1.4.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	65
7.1.4.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	65
7.1.5	Initialer Farbwert .....	66
7.1.5.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	66
7.1.5.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	67
7.1.6	Transluzenz und Farbwerte (Lab).....	67
7.1.7	Transluzenz.....	67
7.1.7.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	68
7.1.7.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	68
7.1.7.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	69
7.1.8	Korrelationen zwischen Transluzenz- und Farbwerten .....	70
7.1.9	L-Wert.....	71

7.1.9.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	71
7.1.9.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	72
7.1.9.3	Einfluss der hydrothermalen Alterung.....	72
7.1.10	Transluzenz- und Farbänderung .....	74
7.1.10.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	74
7.1.10.2	Einfluss Transluzenzstufe .....	75
7.2	Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken .....	76
7.2.1	Biaxiale Biegefestigkeit .....	76
7.2.1.1	Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach hydrothormaler Alterung (100 h) .....	76
7.2.1.2	Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+.....	77
7.2.1.3	Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+ .....	78
7.2.2	Weibull Modul.....	80
7.2.2.1	Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach hydrothormaler Alterung (100 h) .....	80
7.2.2.2	Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+ .....	81
7.2.2.3	Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+.....	81
7.2.3	Charakteristische Festigkeit .....	82
7.2.3.1	Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach hydrothormaler Alterung (100 h) .....	82
7.2.3.2	Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+ .....	83
7.2.3.3	Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+ .....	83

7.3	Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken.....	85
7.3.1	Biaxiale Biegefestigkeit .....	85
7.3.1.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	85
7.3.1.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	86
7.3.1.3	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits.....	86
7.3.2	Weibull Modul .....	87
7.3.2.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	87
7.3.2.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	88
7.3.2.3	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits.....	88
7.3.3	Charakteristische Festigkeit .....	89
7.3.3.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	89
7.3.3.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	90
7.3.3.3	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits.....	90
7.3.4	Transluzenz und Farbwerte (Lab).....	91
7.3.5	Transluzenz .....	91
7.3.5.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	91
7.3.5.2	Einfluss der Transluzenzstufe de CAD/CAM-Blöcke.....	93
7.3.5.3	Einfluss des Befestigungskomposits.....	93
7.3.5.4	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits .....	94
7.3.6	Korrelationen zwischen Transluzenz- und Farbwerten .....	96
7.3.7	L-Wert.....	96
7.3.7.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	96
7.3.7.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	98
7.3.7.3	Einfluss des Befestigungskomposits.....	98
7.3.7.4	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits .....	98
7.3.8	Transluzenz- und Farbänderung .....	101
7.3.8.1	Einfluss der Silikatkeramik.....	101

7.3.8.2	Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke.....	102
7.3.8.3	Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits.....	103
8	Diskussion.....	106
8.1	Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung .....	106
8.2	Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken .....	111
8.3	Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken.....	113
8.4	Limitierungen.....	117
9	Schlussfolgerung.....	119
10	Zusammenfassung.....	121
11	Literaturverzeichnis .....	123
12	Tabellenverzeichnis .....	134
13	Abbildungsverzeichnis.....	136
14	Danksagung.....	139
15	Eidesstattliche Versicherung.....	140

## **1 Vorwort**

Einige der Inhalte der vorliegenden Arbeit wurden bereits an anderer Stelle publiziert und zur Publikation eingereicht:

Mandl A, Liebermann A, Stawarczyk B. Einfluss der adhäsiven Befestigung auf die Ästhetik von Silikatkeramikrestaurationen. ZMK aktuell. 2018;34:856-63. [1]

Stawarczyk B, Mandl A, Liebermann A. Modern CAD/CAM silicate ceramics, their translucency level and impact of hydrothermal aging on translucency, Martens hardness, biaxial flexural strength and their reliability. J Mech Behav Biomed Mater. 2021 Mar 13.

Liebermann A, Mandl A, Eichberger M, Stawarczyk B. Impact of resin composite cement on color values of CAD/CAM ceramics. Dent Mater. (Manuskript eingereicht am 16. Juli 2020)



## 2 Einleitung

Festsitzende Versorgungen haben in der restaurativen Zahnheilkunde in den letzten Jahrzehnten deutlich an Bedeutung zugenommen, was unter anderem in einer sinkenden Prävalenz der Zahnlosigkeit in der deutschen Bevölkerung begründet ist. So sank die Prävalenz der Zahnlosigkeit seit 1997 um 50%. Ebenso konnte im Rahmen der Fünften Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS V) in diesem Zeitraum ein Rückgang kariöser Erkrankungen bei Kindern und Erwachsenen verzeichnet werden [2]. Diese Faktoren sind mitunter dafür verantwortlich, dass restaurative Versorgungen wie Kronen oder Brücken weiter an Bedeutung gewinnen. Zum Zeitpunkt des Jahres 2005 hatte bereits jeder dritte deutsche Erwachsene eine restaurative Versorgung erhalten [3]. Der steigende Bedarf an restaurativen Versorgungen zeichnet sich auch in wirtschaftlicher Hinsicht ab. So wurde der Marktwert für die globale restaurative Zahnheilkunde für das Jahr 2016 mit USD 14,59 Mrd. geschätzt. Das prognostizierte durchschnittliche jährliche Wachstum wird zwischen 2018 und 2025 mit etwa 7% angegeben, was unter anderem durch eine insgesamt steigende Anzahl an Zahnarztpraxen, die starke Weiterentwicklung insbesondere im Bereich der digitalen Zahnheilkunde sowie auch die steigende Nachfrage nach kosmetisch ansprechenden zahnärztlichen Versorgungen begründet wird [4]. Neben verschiedenen Legierungen und Kunststoffen zählen dentale Keramiken heute zu den etablierten Werkstoffen, die in der restaurativen Zahnheilkunde Verwendung finden. Keramische Versorgungen und hier insbesondere silikatkeramische Versorgungen zeichnen sich sowohl durch vorteilhafte mechanische als auch durch sehr gute optische Eigenschaften aus [5, 6]. Es konnte gezeigt werden, dass sich dentale Silikatkeramiken z. B. in Bezug auf die Abrasionsbeständigkeit und die ästhetischen Eigenschaften ähnlich dem menschlichen Zahnschmelz verhalten [7]. Außerdem weisen sie eine hohe Biokompatibilität auf, was ihre Eignung für die Verwendung an und im menschlichen Körper rechtfertigt [8, 9]. Besonders die sehr guten optischen Eigenschaften stellen einen entscheidenden Vorteil gegenüber metallbasierten Restaurationen dar, die bisher z. B. in Form von verblendeten Metallkronen häufiger zum Einsatz kamen. In diesem Bereich werden zunehmend vollkeramische monolithische Restaurationen verwendet, nicht zuletzt um die genannten vorteilhaften optischen Eigenschaften dieser Werkstoffe zu nutzen [5, 10, 11]. Es steigt seitens der Patienten die Nachfrage nach ästhetischen Restaurationen, die sich nur schwer von echten Zähnen unterscheiden lassen [12]. Neben diesen ästhetischen Ansprüchen stellt die S3-Leitlinie

für vollkeramische Kronen und Brücken die stetige Weiterentwicklung keramischer Werkstoffe als relevanten Faktor heraus, der die zunehmende Bedeutung dieser Werkstoffe unterstreicht [11, 13]. Abgesehen von der Anwendung im Seitenzahnbereich, wird der Einsatz silikatkeramischer Werkstoffe vor allem auch im ästhetischen Frontzahnbereich empfohlen [11].

### **3 Literaturübersicht**

Im Folgenden soll eine literarische Übersicht über dentale Keramiken, ihre Herstellung sowie ihre mechanischen und optischen Eigenschaften gegeben werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf die in dieser Dissertation angewandten Methoden gelegt.

#### **3.1 Einteilung dentaler Keramiken**

Dentale Keramiken lassen sich in verschiedene Gruppen unterteilen. Sie können sowohl nach ihren Hauptbestandteilen, nach ihrer Verarbeitungstechnik (geschichtete Verfahren, Presstechnik, CAD/CAM-Verfahren) oder auch nach ihrem Indikationsbereich (Monolithische Versorgungen, Gerüste, Implantatbasen usw.) unterteilt werden [5, 6, 11, 14].

Folgt man der Unterteilung nach den Hauptbestandteilen, werden heute folgende Werkstoffe voneinander unterschieden:

1. Wenig verstärkte oder unverstärkte Silikatkeramiken
  - a. Leuzitbasierte Silikatkeramiken
2. Verstärkte Silikatkeramiken (Lithiumsilikatkeramiken)
  - a. Lithiumdisilikatkeramiken
  - b. Lithiummetasilikatkeramiken
  - c. Lithiumaluminiumsilikatkeramiken
3. Zirkonoxid ohne Glasphase

#### **3.2 Herstellungsverfahren und Eigenschaften dentaler Silikatkeramiken**

Die Grundsubstanz Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), welche den Glasanteil der späteren Silikatkeramik darstellt, bildet die sogenannte amorphe Phase oder Glasphase. Bei Siliziumdioxid handelt es sich um Quarzsand, einen häufig verwendeten Netzbildner, neben Bortrioxid ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) und Phosphorpentoxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Im Rahmen des Herstellungsprozesses wird die Glasphase mit

silikatischen Mineralien oder Kristallen angereichert und kann so die Eigenschaften des Werkstoffes variieren [15]. Während des Herstellungsprozesses kommt es zur Keimbildung und entweder überlappend oder anschließend zur Kristallisation (bei ca. 800 °C). Weitere Bestandteile der Silikatkeramiken sind Netzwerkwandler wie z. B. Lithiumoxid ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) oder Netzbildner wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), die unter anderem die Schmelztemperatur sowie die Viskosität senken und den Wärmeausdehnungskoeffizienten erhöhen können. Lithiumoxid kann außerdem als Flussmittel genutzt werden und in dieser Rolle die Kristallisationsneigung und so die Festigkeit eines Werkstoffes erhöhen [14, 16, 17]. Nach dem Schmelzen wird der Werkstoff je nach Verarbeitungstechnik unterschiedlich behandelt und anschließend für die Herstellung eines Keramikpulvers zur Verarbeitung in der Schichttechnik oder als Pressrohling verwendet oder durch direkte Formung aus der Schmelze zu einem CAD/CAM-Block verarbeitet [14].

Entsprechend ihrer Einteilung unterscheiden sich leuzitbasierte Silikatkeramiken und Lithiumsilikatkeramiken in ihrer Zusammensetzung und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften, weshalb im folgenden Abschnitt näher darauf eingegangen werden soll:

Leuzitbasierte Silikatkeramik beinhaltet Leuzit ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) als kristallinen Anteil mit einer mittleren Korngröße von 1-5  $\mu\text{m}$  und weist Biegefestigkeitswerte im Bereich von 85-120 MPa auf [18-20].

Bei Lithiummetasilikat- und Lithiumdisilikatkeramik stellen Lithiumoxid ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) die hauptsächlichen kristallinen Bestandteile dar. Lithiummetasilikatkeramiken können in ihrer Glasphase bis zu 10% ungelöstes Zirkonoxid enthalten. Durch die Verwendung stäbchenförmiger Lithiumdisilikatkristalle einer Größe von 3-6  $\mu\text{m}$  konnte die Festigkeit bei Lithiumdisilikatkeramiken gegenüber z. B. leuzitbasierten Silikatkeramiken deutlich gesteigert werden. Hier werden Werte von bis zu 400 MPa Biegefestigkeit verzeichnet [14, 17, 20].

Bei den Lithiumaluminiumsilikatkeramiken wird eine gemeinsame Kristallisation von einerseits Lithiumdisilikat und andererseits Lithiumaluminosilikat vorgenommen.

Der Indikationsbereich silikatkeramischer Restaurationen erstreckt sich mittlerweile von der Herstellung von Kronen, Inlays, Onlays, Table-Tops und Teilkronen bis hin zur Herstellung von Veneers und Verblendungen. Für Lithiumdisilikatkeramik besteht laut neusten Erkenntnissen auch eine Indikation für dreigliedrige Brücken mit einem Zwischenglied bis zum ersten Prämolaren sowie für Implantatbasen. In der aktuellen S3-Leitlinie wird jedoch berichtet,

dass die Datenlage für eine Langzeitprognose zu Restaurationen dieser Art noch nicht ausreichend ist [11, 14].

Für leuzit- oder lithiumdisilikatkeramische Einzelkronen im Front- oder Seitenzahnbereich werden über eine Zeitspanne von 5 Jahren Überlebensraten zwischen 73,2 und 100% angegeben [21-24]. Langzeitüberlebensraten über eine Zeitspanne von bis zu 20 Jahren werden mit 78,5 bis 100% angegeben [25-28]. Zu Lithiummeta- und Lithiumaluminiumsilikatkeramik ist noch keine ausreichende klinische Datenlage vorhanden.

Wie bereits erwähnt, besitzen dentale Silikatkeramiken optimale mechanische und optische Eigenschaften, weshalb in den folgenden Abschnitten ein Überblick über etablierte und objektivierbare Messgrößen zur Untersuchung dieser Eigenschaften gegeben werden soll.

### **3.3 Mechanische Parameter dentaler Keramiken**

#### **3.3.1 Härteprüfverfahren**

Die Erhebung der Härte ist ein wichtiges Verfahren zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften dentaler Werkstoffe. Im Unterschied zur Festigkeit, die über den Widerstand, den ein Werkstoff einer Verformung entgegensetzen kann, definiert wird, ist die Härte der Widerstand, den ein Werkstoff einem Eindringkörper entgegensetzen kann. Der Eindringkörper besteht in den meisten Fällen aus einem pyramidenförmigen, diamantierten Bauteil und wird als Vickerspyramide bezeichnet. Andere Geometrien für Eindringkörper sind eine Hartmetallkugel, ein kugelförmiger Diamant-Eindringkörper und der Berkovich-Eindringkörper. Je nach Formgebung hinterlässt ein Eindringkörper einen mikroskopisch sichtbaren Eindruck an der Oberfläche [29-31].

##### **3.3.1.1 Martenshärteparameter**

Die Martenshärtemessung (HM) oder instrumentierte Eindringprüfung, die bis 2003 als Universalhärte bezeichnet wurde, wird in  $\text{N/mm}^2$  angegeben und ist definiert als das Verhältnis der maximalen Kraft zur Fläche, mit der der Eindringkörper in Kontakt tritt. Die Durchführung wird durch die Prüfnorm DIN EN ISO 14577-1 festgelegt [30]. Es kommt während der Durchführung zu einer kontinuierlichen Aufzeichnung der aufgewendeten Kräfte und Eindringtiefe sowohl bei der Be- als auch bei der Entlastung. Nach Positionierung eines Prüfkörpers in der Prüfmaschine senkt sich der Härtemesskopf mit konstanter Geschwindigkeit

(z. B. 0,1 mm/min) so weit ab, dass der Eindringkörper in Kontakt mit dem Prüfkörper tritt. Bei Erreichen der maximalen Prüfkraft (9,807 N) wird diese für 10 sek gehalten und danach wieder verringert. Bei der im Rahmen der vorliegenden Dissertation verwendeten Vickerspyramide handelt es sich um eine gleichseitige Pyramide, die einen Öffnungswinkel von 136° hat. Sie hinterlässt bei korrekter Ausführung eine mikroskopisch sichtbare Impression im Prüfkörper. Vorteil dieser Messmethode ist, dass neben der Martenshärte weitere Messgrößen wie der elastische Eindringmodul (EIT) und die Eindringhärte (HIT) bestimmt werden können [31]. Somit beschränkt sich die Methode nicht nur auf die Analyse des plastischen Verhaltens eines Werkstoffs, sondern erlaubt auch Aussagen über elastische Eigenschaften. Daher wird die Erhebung der Martenshärteparameter zur Untersuchung dentaler Werkstoffe empfohlen [29, 31, 32].

Errechnet werden Martenshärte (HM) und der elastische Eindringmodul (EIT) wie folgt [30]:

$$HM = F/A_s(h)$$

**HM:** Martenshärte [N/mm<sup>2</sup>]

**F:** Testkraft [N]

**A<sub>s</sub> (h):** 26,43 x h<sup>2</sup> [mm<sup>2</sup>] Oberfläche des Diamant-Eindringkörpers im Abstand h von der Spitze

$$EIT = (1 - \nu_s^2) \left( \frac{2\sqrt{A_P(h_c)}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right)^{-1}$$

**EIT:** Elastic Indentation [kN/mm<sup>2</sup>]

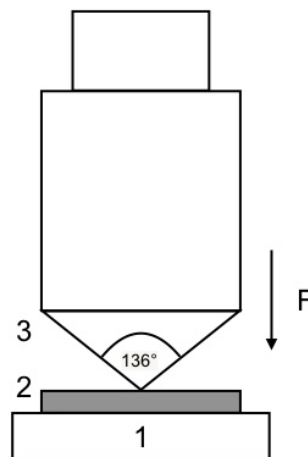
**ν<sub>s</sub>:** Poisson'sches Verhältnis der Prüfkörper

**ν<sub>i</sub>:** Poisson'sches Verhältnis des Eindringkörpers

### 3.3.1.2 Vickershärte

Neben der Martenshärte findet die Vickershärte (HV) als ein weiteres Maß für die Härte von Werkstoffen regelhaft Anwendung. Beschrieben wird sie korrekterweise unter Angabe des Härtewertes, der Messmethode und der Prüfkraft [kp]. Sie eignet sich vor allem zur Untersuchung homogener Werkstoffe. Die Vickerspyramide wird hier ebenfalls als Eindringkörper für die Messung verwendet. Mit einer vorgegebenen Prüfkraft wird die Pyramide nach Positionierung des Prüfkörpers abgesenkt und sollte bei korrekter Durchführung

eine exakte und symmetrische Impression hinterlassen. Die Durchführung wird durch die Prüfnorm DIN EN ISO 6507-1 vorgeschrieben [33]. Mit der Härteprüfung nach Vickers können im Gegensatz zur instrumentierten Härteprüfung keine elastischen Messgrößen eines Werkstoffs erhoben werden. Abbildung 1 zeigt ein Schema des Versuchsaufbaus.



**Abbildung 1:** Schematischer Versuchsaufbau der Härteprüfung nach Vickers mit 1: Prüfkörperauflage, 2: Prüfkörper, 3: Vickerspyramide, F: Einwirkende Prüfkraft.

### 3.3.2 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit, angegeben in MPa ( $=\text{N}/\text{mm}^2$ ), ist ein weiterer wichtiger Parameter zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften dentaler Werkstoffe. Sie dient insbesondere zur Einschätzung der Festigkeit. So gibt sie an, wann es bei einem Werkstoff zur Fraktur kommt. Hierzu wird ein Werkstoff einmalig so lange einer konstanten Krafteinwirkung ausgesetzt, bis die Grenze der Belastbarkeit des Werkstoffs überschritten wird und dieser frakturiert. Berechnet wird die Biegefestigkeit aus dem Verhältnis von aufgebrachter Kraft [N] zu Querschnitt und Dicke des geprüften Werkstoffs. Generell eignen sich Biegeversuche für spröde Materialien wie Keramik, da sie sich weniger gut Zug- als Druckbelastungen widersetzen können und im Rahmen von Biegeversuchen überwiegend Druckbelastungen ausgeübt werden, auch wenn neben einer Druckzone auch eine Zugzone mit geringerem Einfluss vorhanden ist [14, 34].

Neben den uniaxialen Messmethoden (Drei- und Vierpunktbiegeversuch), hat sich die biaxiale Biegefestigkeitsmessung bewährt. Für alle Biegeversuche muss eine Universalprüfmaschine verwendet werden, die den Anforderungen der Prüfnorm DIN EN ISO 7500:1 entspricht [35].

### 3.3.2.1 Biaxiale Biegefestigkeit

Die Erhebung der biaxialen Biegefestigkeit erfolgt nach den Vorgaben der Prüfnorm DIN EN ISO 6872 [36]. Nach Dokumentation des Durchmessers und der Schichtstärke wird jeweils ein Prüfkörper mittig auf drei Stahlkugeln (Durchmesser  $4,5 \pm 2$  mm) und exakt unterhalb eines Prüfstempels (Durchmesser  $1,4 \pm 0,2$  mm) platziert. Die Anordnung der Stahlkugeln ergibt einen Kreis (Durchmesser  $11 \pm 1$  mm), auf welchem die Kugeln mit einem Abstand von  $120^\circ$  angeordnet sind. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist Abbildung 15 zu entnehmen. Der Prüfstempel senkt sich nach dem Starten des Messvorgangs in der Software mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min in Richtung des Prüfkörpers ab, bis dieser frakturiert. Mithilfe der folgenden Formel kann die biaxiale Biegefestigkeit errechnet werden [36]:

$$\sigma = -0,2387 P (X-Y)/b^2$$

**$\sigma$ :** Maximale Zugspannung in der Mitte [MPa]

**P:** Beim Bruch gemessene Gesamtkraft [N]

$$X = (1+\nu) \ln(r_2/r_3)^2 + [(1-\nu)/2](r_2/r_3)^2$$

$$Y = (1+\nu)[1 + \ln(r_1/r_3)^2] + (1-\nu)(r_1/r_3)^2$$

**$\nu$ :** Poisson'sche Querkontraktionszahl

**$r_1$ :** Radius des Unterstützungskreises [mm]

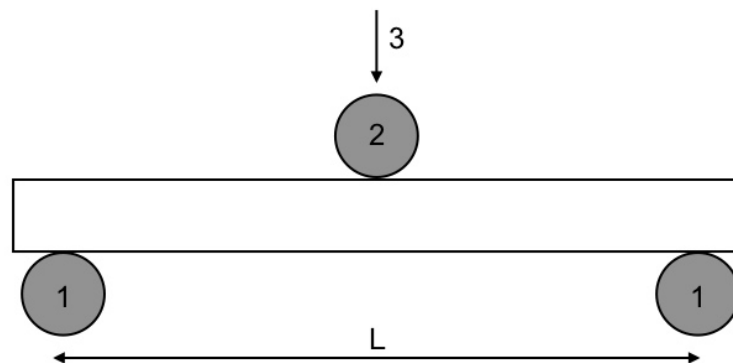
**$r_2$ :** Radius des belasteten Bereichs [mm]

**$r_3$ :** Radius des Prüfkörpers [mm]

**b:** Dicke des Prüfkörpers [mm]

### 3.3.2.2 Dreipunktbiegefestigkeit

Entsprechend der durch die Prüfnorm vorgegebenen Bedingungen besteht die Prüfapparatur für den Dreipunktbiegeversuch aus zwei Auflagerrollen [36]. Die Kraft wird über eine weitere Rolle in der Mitte der beiden Auflagerrollen auf einen quaderförmigen Prüfkörper aufgebracht bis es durch Überschreiten der elastischen Grenze des Werkstoffs zur Fraktur kommt. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der beiden Auflagerrollen sollte nach Möglichkeit auf 0,1 mm genau gemessen werden. Die Krafteinwirkung sollte exakt mittig zwischen den beiden Auflagerrollen erfolgen [36]. Abbildung 2 bildet schematisch den Versuchsaufbau ab.



**Abbildung 2:** Schematischer Versuchsaufbau des Dreipunktbiegeversuchs mit 1: Auflagerrollen, 2: Belastungsrolle, 3: Einwirkende Kraft, L: Distanz zwischen den Mittelpunkten der Auflagerrollen.

Berechnet wird die Biegefestigkeit  $\sigma$  [MPa] im Dreipunktbiegeversuch wie folgt:

$$\sigma = \frac{3 PL}{2 wb^2}$$

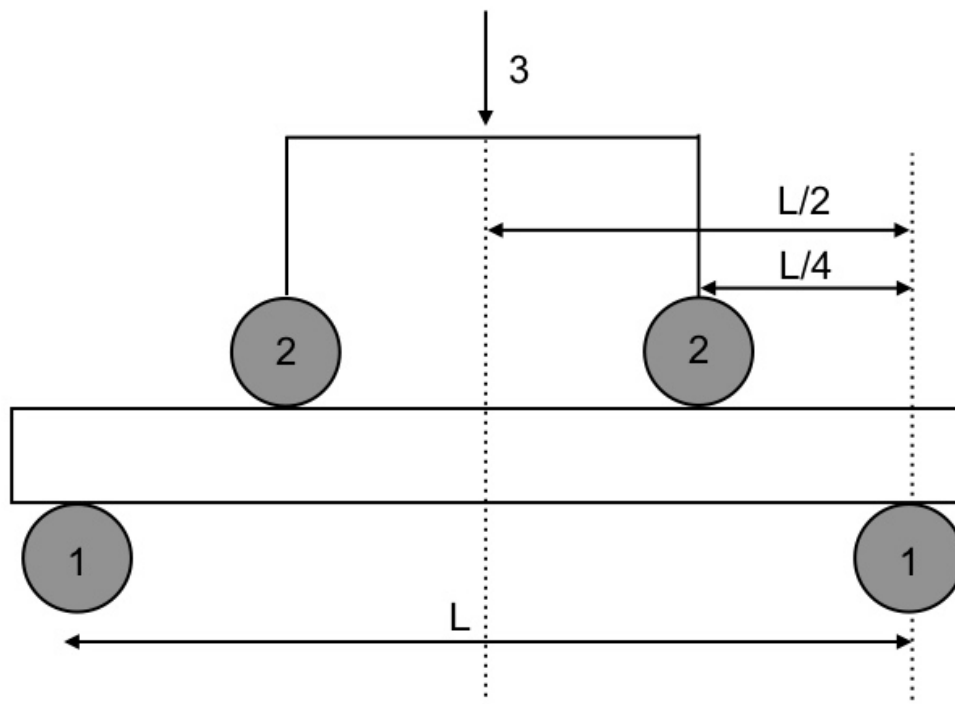
- $\sigma$ :** Biegefestigkeit [MPa]
- P:** Bruchkraft [N]
- L:** Prüfspannweite (Abstand der Mittelpunkte der Auflagerrollen) [mm]
- w:** Breite des Prüfkörpers [mm]
- b:** Dicke des Prüfkörpers [mm]

Nachteil des Dreipunktbiegeversuchs ist, dass die Kraft, die über die Belastungsrolle auf den Prüfkörper ausgeübt wird, auf einen kleinen Bereich des Prüfkörpers beschränkt ist. Neben der Druckbelastung durch die Belastungsrolle kommt es hier zur Ausbildung von Querkräften [37]. Des Weiteren sind die Beschaffung der Oberfläche und der Kanten des Prüfkörpers bei der Durchführung dieses Versuchs von enormer Wichtigkeit, weil kleinste Ungenauigkeiten zu einer verfrühten Fraktur führen können. Es können aufgrund der Kraftverteilung im Dreipunktbiegeversuch durchschnittlich höhere Werte erreicht werden, als bei der Verwendung vergleichbarer Messmethoden [38, 39].



### 3.3.2.3 Vierpunktbiegefestigkeit

Der Versuchsaufbau des Vierpunktbiegeversuchs unterscheidet sich insofern von dem des Dreipunktbiegeversuchs, dass eine weitere Rolle von oben auf den Prüfkörper aufgebracht wird, sodass zwei Belastungsrollen innen zwischen den Auflagerrollen zum Liegen kommen. Dies erfolgt über eine Prüfkonfiguration, die die Kraft beider Belastungsrollen auf den Prüfkörper überträgt. Die Belastungsrollen sollten so zu den Auflagerrollen positioniert werden, dass sie sich genau ein Viertel der Distanz zwischen den Mittelpunkten der beiden Auflagerrollen befinden. Grenzwerte für die jeweiligen Distanzen sind der entsprechenden Prüfnorm für keramische Werkstoffe zu entnehmen [40]. Die Vorgaben für die Beschaffenheit von Auflager- und Belastungsrollen entsprechen denen des Dreipunktbiegeversuchs. Die Prüfkörpergeometrie ist wie im Dreipunktbiegeversuch quaderförmig. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist Abbildung 3 zu entnehmen.



**Abbildung 3:** Schematischer Versuchsaufbau des Vierpunktbiegeversuchs mit 1: Auflagerrollen, 2: Belastungsrollen, 3: Einwirkende Kraft, L: Distanz zwischen den Mittelpunkten der Auflagerrollen,  $L/2$  bzw.  $L/4$ : Halbierte bzw. geviertelte Distanz zwischen den Mittelpunkten der Auflagerrollen.

Die Berechnung der Biegefestigkeit  $\sigma$  [MPa] für den Vierpunktbiegeversuch wird wie folgt durchgeführt:

$$\sigma = \frac{3 PL}{2 wb^2}$$

- $\sigma$ :** Biegefestigkeit [MPa]  
**P:** Bruchkraft [N]  
**L:** Mittenabstand zwischen den äußeren Auflagerrollen [mm]  
**w:** Breite des Prüfkörpers [mm]  
**b:** Dicke des Prüfkörpers [mm]

Der Vierpunktbiegeversuch kann als Weiterentwicklung des Dreipunktbiegeversuchs betrachtet werden, da hier versucht wird, die Kraftverteilung auf dem Prüfkörper gleichmäßiger zu gestalten. Durch die Verwendung einer zweiten Belastungsrolle kann einerseits die einwirkende Kraft auf eine größere Fläche des Prüfkörpers verteilt werden, andererseits kann so der Entstehung von Querkraften entgegengewirkt werden. Es erfolgt eine konstante Biegebelastung des Werkstoffs, bis dieser frakturiert [40].

### 3.4 Weibull Modul und charakteristische Festigkeit

Der Weibull Modul  $m$  ist ein Maß für die Zuverlässigkeit eines Werkstoffs und kann unter anderem aus den Werten der Biegefestigkeit ermittelt werden. Er erlaubt Aussagen über die Qualität eines Werkstoffs, d. h. über die Homogenität und Zuverlässigkeit des Gefüges. Außerdem erlaubt der Weibull Modul als mathematisches Modell Aussagen über das Streuverhalten eines Werkstoffs. Für die Werte des Weibull Moduls gilt, dass ein hoher Wert einen zuverlässigen Werkstoff und ein niedriger Wert für einen weniger zuverlässigen Werkstoff spricht. Die Werte dentaler Keramiken liegen meist zwischen 5 und 15 [41].

Die charakteristische Festigkeit beschreibt die Kraft, bei der 63,2% der Prüfkörper des gleichen Werkstoffs und gleicher Geometrie frakturieren würden. Sie wird in MPa angegeben [42].

Für die Bestimmung des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit gilt generell, dass eine Messreihe mindestens 30 Prüfkörper enthalten sollte, um eine exakte Berechnung zu ermöglichen. Jedoch werden besonders in der dentalen Werkstoffkunde häufig kleinere Messreihen verwendet. Deshalb wurde 2015 ein Verfahren entwickelt, mithilfe dessen auch kleinere Messreihen analysiert werden können [42].

### 3.5 Optische Parameter dentaler Keramiken

Wie bereits weiter oben erwähnt, weisen silikatkeramische Werkstoffe vorteilhafte optische Eigenschaften auf wenn es darum geht, dem Patientenwunsch nach ästhetisch anspruchsvollen Restaurationen nachzukommen [12]. Gegenüber den zunächst stärker verbreiteten metallbasierten oder gänzlich in Metall gearbeiteten Versorgungen bieten vollkeramische Versorgungen einen deutlichen ästhetischen Vorteil. Je nach Zusammensetzung, Schichtstärke und Hintergrund können sie unterschiedliche Transluzenzstufen aufweisen [43]. In einer Untersuchung aus dem Jahre 2000, dass Lithiumdisilikatkeramik bei einer Schichtstärke von 1 mm eine mit natürlichen Zähnen vergleichbare Transluzenz erreicht [44]. Neben silikatkeramischen Restaurationen sind in dieser Hinsicht auch Restaurationen aus Zirkonoxid auf dem Vormarsch, die in den neueren Generationen durch eine veränderte Konfiguration ihrer Struktur verbesserte optische Eigenschaften aufweisen. Verglichen mit z. B. Restaurationen aus Lithiumsilikatkeramik weisen Restaurationen aus Zirkonoxidkeramiken jedoch auch in den neueren Generationen etwas schlechtere optische Eigenschaften wie z. B. eine geringere Transluzenz auf, weshalb silikatkeramische Versorgungen insbesondere im ästhetischen Frontzahnbereich weiterhin zu den am häufigsten verwendeten Werkstoffen zählen [45, 46]. Der sogenannte ‚Chamäleoneffekt‘ erlaubt ihnen, Umgebungslicht zu leiten und sich harmonisch in die bestehende Zahnreihe einzufügen [47]. Durch ein Zusammenspiel aus verschiedenen Faktoren können silikatkeramische Restaurationen bei korrekter Auswahl und Gestaltung kaum von einem echten Zahn unterschieden werden, was schlussendlich zu einer erhöhten Zufriedenheit auf der Patienten- wie auch auf der Behandlerseite beitragen kann [45, 46].

#### 3.5.1 Transluzenz, Opazität und Transparenz

Die Transluzenz oder partielle Lichtdurchlässigkeit ist ein wichtiges Maß, um die optischen Eigenschaften dentaler Keramiken zu beschreiben. Dabei beschreibt der Begriff im eigentlichen Sinne das Verhältnis von einfallendem zu austretendem Licht und wird häufig in Prozent [%] angegeben. In diesem Zusammenhang muss der Begriff der diffusen Transmission erwähnt werden. Hierbei kommt es durch strukturelle Unregelmäßigkeiten im Werkstoff zu einer diffusen Streuung des einfallenden Lichts, welches den Werkstoff anschließend mit verringerter Intensität passiert. Derartige Unregelmäßigkeiten können bei der Herstellung silikatkeramischer Werkstoffe auch gezielt in Form von Kristallen eingebaut werden, um die

hohe Transluzenz der vorhandenen Glasmatrix zu verändern. Die Kristalle werden dann als Streuzentren bezeichnet und verstärken die diffuse Lichttransmission. Durch ein Zusammenspiel aus Korngröße und Zusammensetzung dieser Kristalle kann ein dem natürlichen Zahn nahekommendes Aussehen einer Restauration erzielt werden [48].

Erhoben werden kann die Transluzenz unter anderem mithilfe eines Spektrophotometers. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde ein UV/Vis Spektrophotometer mit integrierter Ulbrichtkugel mit Bariumsulfatstandard (Lambda 35, PerkinElmer LAS, Waltham, USA) verwendet. Durch die Ermittlung der Lichttransmission innerhalb eines bestimmten Wellenlängenbereichs (400 bis 700 nm) können neben der Transluzenz auch Farbwerte sowie Farbänderungen ermittelt werden. Zunächst ermittelt das Gerät in einem festgelegten Intervall die Intensität des monochromatischen Lichts  $I_0$  und des Lichts  $I$ , das den Prüfkörper passiert. Mit der Gleichung  $I/I_0 = t_c^x$  wird anschließend der sogenannte Übertragungskoeffizient  $t_c$  [%] ermittelt. Die Transluzenz (%T), oder auch Lichttransmission, wird durch Integration ( $t_c(\lambda) d\lambda$  [10<sup>-5</sup>]) aller  $t_c$ -Werte errechnet und durch Dividierung durch den Ausgangswert vor Einsetzen des Prüfkörpers in das Gerät ermittelt. Dieser Wert beschreibt die Lichtdurchlässigkeit eines Prüfkörpers, wobei ein Wert von 100% einen transparenten und ein Wert von 0% einen opaken Werkstoff beschreibt [31].

Eine nicht vorhandene Lichtdurchlässigkeit bzw. eine mangelhafte Lichtdurchlässigkeit wird demnach als Opazität bezeichnet, wie sie z. B. bei metallischen Werkstoffen oder Legierungen vorliegt. Durch eine vollständige Absorption und/oder Reflexion des einfallenden Lichtes kommt es in diesem Fall nicht zur Streuung oder diffusen Transmission des Lichtes [49]. Daraus lässt sich ableiten, dass metallbasierte Versorgungen wie z. B. ein verblendetes Metallgerüst eine geringere Transluzenz aufweisen können, als etwa eine Einzelkrone aus Lithiumsilikatkeramik. Jedoch kann man sich die Eigenschaft der Opazität auch zunutze machen, wenn z. B. eine dunkle Stumpffarbe kaschiert werden soll [48].

Abzugrenzen ist weiterhin der Begriff der Transparenz, der durch eine vollständige Lichtdurchlässigkeit gekennzeichnet ist, wie es z. B. bei Glas oder Wasser der Fall ist. Das eintreffende Licht wird hier weder absorbiert noch gestreut, wobei die Oberflächenqualität in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle spielt. Kommt es zu einer mechanischen Aufrauung der Oberfläche, besteht keine vollständige Lichtdurchlässigkeit mehr, weil es zu einer diffusen Streuung des Lichtes kommt. Der Werkstoff würde nun folglich nicht mehr als transparent sondern als transluzent bezeichnet werden [31].

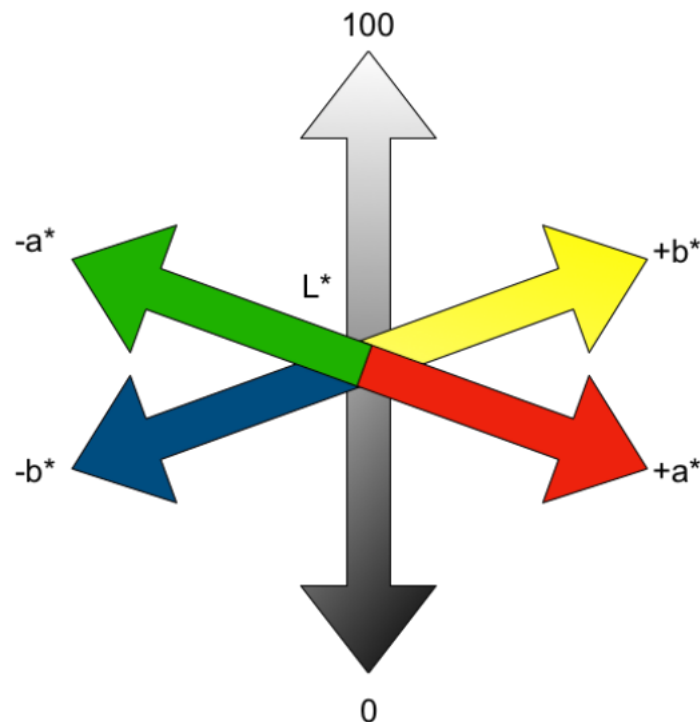
### 3.5.2 Farbbestimmung

Neben der Transluzenz wurde für die vorliegende Untersuchung auch die Farbänderung bestimmt. Da der subjektive Eindruck von Farbe individuell stark differieren kann und von vielen verschiedenen Umgebungsfaktoren abhängig ist, wurden in der Vergangenheit verschiedene Systeme entwickelt, um eine objektive und vergleichbare Bestimmung von Farbwerten zu ermöglichen. 1931 entwickelte die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) das sogenannte CIE-XYZ-System, mithilfe dessen Farben über Angabe dreier Koordinaten (x, y und z) angegeben werden können. Die dem CIE-XYZ-System zugrundeliegende zweidimensionale Farbskala zeigte jedoch entscheidende Nachteile in der Anwendung, da z. B. eine übermäßig starke Repräsentierung der Farbe Grün gegenüber den Farben Blau und Rot vorherrschte. Dies führte zu einer schlechteren Beurteilbarkeit von Farbunterschieden, weshalb auf dieser Grundlage 1976 das CIELAB-System entwickelt wurde. Das CIELAB-System bezieht sich auf ein kugelförmiges, dreidimensionales Koordinatensystem, aus welchem Farben jeder Art, unabhängig von der Messmethode, abgelesen werden können. Damit erlaubt es dem Anwender, Farbunterschiede durch Berechnung von Abständen zwischen zwei Farben innerhalb dieses Koordinatensystems exakt zu errechnen. Da es sich beim CIELAB-System um ein mathematisches Modell handelt, ist es universell einsetzbar und international vergleichbar [50-52].

Das System verwendet die Koordinaten  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ . Auf der mit  $L^*$  bezeichneten Achse wird die Helligkeit oder Luminanz beschrieben und von 0 bis 100 angegeben. Grüne und rote Anteile einer Farbe werden durch die  $a^*$ -Achse repräsentiert, wobei negative Werte Grün und positive Werte Rot abbilden und die Werte von -170 bis +100 reichen. Blaue und gelbe Anteile einer Farbe werden durch die  $b^*$ -Achse angegeben. Negative Werte repräsentieren hier die blauen und positive Werte die gelben Anteile. Die Werte der  $b^*$ -Achse reichen von -100 bis +150. Der bei der Farbmessung ermittelte  $L^*a^*b^*$ -Wert gibt einen spezifischen Punkt innerhalb des dreidimensionalen Koordinatensystems an [53]. Mit einem Spektrophotometer ermittelte  $L^*a^*b^*$ -Werte können anschließend in eine spezielle Software (z. B. Color Application Software V1.00, PerkinElmer Inc.) eingespeist werden. So kann der Farbunterschied  $\Delta E$  zweier Werte mithilfe der folgenden Formel durch die Ermittlung des euklidischen Abstandes mehrerer Koordinaten innerhalb des CIELAB-Koordinatensystems berechnet werden [54]:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

Vorgeschrieben wird die Vorgehensweise durch die Prüfnorm DIN EN ISO 11664-4 [54]. Ein vereinfachtes Schema des CIELAB-Systems ist Abbildung 4 zu entnehmen.



**Abbildung 4:** Vereinfachte Darstellung des CIELAB-Systems  
Abbildung modifiziert nach Seghi et al. [53].

Eine weitere gängige Methode zur Farbbestimmung ist der LCH-Farbraum, der an dieser Stelle der Vollständigkeit halber kurz erwähnt werden soll. Bei diesem System werden Werte aus dem CIELAB-System in Helligkeit oder Luminanz ( $L$ ), Farbintensität oder Chroma ( $C$ ) und den Winkel der Achse zur Position der Farbe im Koordinatensystem ( $H$ ) umgerechnet. Es wird das gleiche Koordinatensystem wie für das CIELAB-System verwendet, jedoch erfolgt die Ermittlung der Farbe auf eine andere Art und Weise [52]. Basierend auf dem CIELAB-System wurde im Jahre 2000 die CIE 2000 Formel entwickelt, mithilfe derer Farbunterschiede noch exakter analysiert werden können. Die Entwicklung erfolgte durch Modifikation der ursprünglichen Formel [55].

### **3.6 Adhäsive Befestigung**

#### **3.6.1 Traditionelle Zemente und adhäsive Befestigungskomposite**

Die Wahl der Befestigung hängt mit der verwendeten Versorgung zusammen. Für leuzitbasierte Silikatkeramiken wird aufgrund einer niedrigeren Festigkeit stets eine adhäsive Befestigung empfohlen, wohingegen Lithiumsilikatkeramiken mit einer deutlich höheren Festigkeit sowohl traditionell zementiert als auch adhäsiv befestigt werden können. Eine Einschränkung gilt hier für Lithiumaluminasilikatkeramiken, welche adhäsiv befestigt werden sollten. Die adhäsive Befestigung sollte jedoch nach Möglichkeit bevorzugt werden, da für diese Befestigungsart höhere Bruchlastwerte ermittelt werden konnten [56, 57].

#### **3.6.2 Vor- und Nachteile**

Die adhäsive Befestigung ermöglicht eine Erhöhung der Gesamtstabilität, einerseits durch Überkappung geschwächter Höcker, andererseits durch die Ausbildung eines starken adhäsiven Verbunds [57]. Dies stellt einen Vorteil gegenüber anderen Befestigungsarten dar.

Nachteilig ist bei der Anwendung jedoch die absolute Trockenlegung, die eine supra- bzw. isogingival liegende Präparationsgrenze erfordert. Außerdem ist adhäsive Befestigung zum aktuellen Zeitpunkt noch bedeutend teurer als die Befestigung mit traditionellen Zementen [58].

#### **3.6.3 Konventionelle und selbstadhäsive Befestigungskomposite**

Konventionelle Befestigungskomposite beinhalten eine Vorbehandlung des Zahnes, während die sogenannten selbstadhäsiven Befestigungskomposite eine Anwendung ohne Vorbehandlung ermöglichen. Laut Literatur sind konventionelle Befestigungskomposite für die Befestigung silikatkeramischer Restaurationen aufgrund deutlich höherer Haftwerte zu empfehlen [59]. Neben anorganischen Füllkörpern bestehen Befestigungskomposite aus einer auf Methacrylaten basierenden Monomermatrix, während selbstadhäsive Befestigungskomposite zusätzlich Methacrylatmonomere enthalten, die mit Phosphorsäuregruppen versehen sind. Mithilfe dieser sauren Bestandteile soll das vorherige Ätzen der Zahnhartsubstanz entbehrlich gemacht werden [60, 61]. Des Weiteren sind die meisten Befestigungskomposite in verschiedenen Farben erhältlich, sodass eine Abstimmung zwischen Restaurations- und Stumpffarbe erfolgen kann.

### **3.6.3.1 Anwendung konventioneller Befestigungskomposite**

Bei Verwendung eines konventionellen Befestigungskomposits, z. B. auf Dimethacrylatbasis, ist die Anwendung einer Säure (in der Regel Phosphorsäure), eines Primers und eines Bonders von Nöten. Nach der chemischen Aufrauung der Zahnoberfläche durch die Säure, wird durch den Primer eine chemische Adhäsion ermöglicht. Der Primer bindet mit einer OH-Gruppe an das hydrophile Dentin und schafft auf der anderen Seite durch Kohlenstoff-Doppelbindungen eine hydrophobe Oberfläche, an die wiederum die im Bonder enthaltenen Monomere binden können [15]. Je nachdem ob eine Etch&Rinse, Self-Etch oder Selective Etch Technik verwendet wird, unterscheidet sich das Vorgehen. Bei der Etch&Rinse Technik wird die Säure nach der Einwirkzeit abgespült, während der Begriff Self-Etch Systeme bezeichnet, die ohne vorheriges Ätzen angewendet werden können. Die Selective Etch Technik beschreibt die selektive Schmelzätzung [62].

Neben der beschriebenen mikromechanischen Retention muss an dieser Stelle der Begriff der makromechanischen Retention erwähnt werden. Die Relevanz der makromechanischen Retention wird in Bezug auf die adhäsive Befestigung jedoch kritisch diskutiert. Es wird berichtet, dass die mikromechanische Retention hier eine größere Rolle spielt. Bei Befestigung mit adhäsiven Befestigungskompositen kommt es zur Ausbildung eines kraftschlüssigen Verbunds, während traditionelle Zemente durch Ausbildung eines formschlüssigen Verbunds eher auf die makromechanische Retention angewiesen sind [15].

### **3.6.3.2 Selbstadhäsive Befestigungskomposite**

Selbstadhäsive Befestigungskomposite ermöglichen wie erwähnt eine Anwendung ohne Vorbehandlung der Zahnhartsubstanz, was eine deutliche Erleichterung für den Anwender darstellen kann. Hinsichtlich der Haftwerte wird über selbstadhäsive Befestigungskomposite berichtet, dass zum Dentin ein ausreichend starker Haftverbund ausgebildet werden kann. Jedoch sollte bei einer zusätzlichen Beteiligung des Schmelzes eine Vorbehandlung des Schmelzes mit Phosphorsäure erfolgen, um hier zufriedenstellende Haftwerte zu erzielen [59, 63].

### **3.6.3.3 Konditionierung der Restauration**

Unabhängig von der Wahl des Befestigungskomposits muss eine Vorbehandlung jeder silikatkeramischen Restauration erfolgen. Eine ausreichende Vergrößerung (Flusssäure 5-9%)



und anschließende Reinigung (Ultraschallbad mit destilliertem Wasser) stehen hierbei im Vordergrund. Je nachdem, wie hoch der Glasanteil einer Keramik ist, werden unterschiedliche Zeiten für die Ätzung mit Flusssäure angegeben. Während Lithiumsilikatkeramiken 20-30 sek angeätzt werden sollten, wird für leuzitbasierte Silikatkeramiken eine Dauer von 60 sek angegeben [64], da sie einen höheren Glasanteil aufweisen. Nach der Aufrauung und Reinigung der Oberfläche erfolgt das Aufbringen eines Haftvermittlers. Für silikatkeramische Versorgungen stellen Silane das Mittel der Wahl dar. Organische Siliziumverbindungen des Silans reagieren mit durch Ätzung freigelegten Si-OH-Gruppen der Restauration [15]. Silane enthalten weiterhin Kohlenstoff-Doppelbindungen, die einen Haftverbund mit dem Befestigungskomposit ausbilden [65]. Eine Steigerung der Haftkraft durch Applikation eines Silans konnte für verschiedene Silikatkeramiken bestätigt werden [66, 67].

### **3.7 Beeinflussung der Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen**

#### **3.7.1 Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften durch Alterung**

Bisher existieren wenige Untersuchungen, in denen silikatkeramische Werkstoffe einer hydrothermalen Alterung in einem Autoklav zugeführt wurden. Für den Werkstoff Zirkonoxid konnten signifikant verringerte Härte- und Biegefestigkeitswerte ermittelt werden [68, 69].

Für die Methode des Artificial Accelerated Aging (AAA), bei der Prüfkörper sowohl UV-B-Strahlung als auch einer Kondensation ausgesetzt wurden, liegen Untersuchungen vor, die sich mit silikatkeramischen Werkstoffen befasst. Eine dieser Untersuchungen beschäftigte sich mit dem Einfluss des AAA und der Schichtstärke von Prüfkörpern aus sowohl Silikatkeramik als auch Zirkonoxid. Eine variierende Schichtstärke und der Alterungsprozess hatten einen gleichermaßen signifikanten Einfluss auf die Farbänderung der Prüfkörper [70]. Silikatkeramische Prüfkörper, die ebenfalls der AAA zugeführt wurden, zeigten in einer weiteren Untersuchung auch nach langer Expositionsdauer (300 h) keine Farbveränderungen mit klinischer Relevanz [71]. Zwei ähnliche Untersuchungen konnten keinen Einfluss hydrothermalen Alterung auf die mechanischen Eigenschaften einer untersuchten CAD/CAM Silikatkeramik zeigen, während ein signifikanter Einfluss auf weitere untersuchte Materialien (Zirkonoxid, CAD/CAM Komposit und ein Hybridmaterial) gezeigt werden konnte [72, 73]. Eine weitere Untersuchung befasste sich mit dem Einfluss hydrothermalen Alterung auf verschiedene Zirkonoxidkeramiken sowie eine pressbare Silikatkeramik als Kontrollgruppe,

wobei auch hier kein Einfluss der Alterung auf die mechanischen Eigenschaften der Silikatkeramik, wohl aber auf die optischen Eigenschaften im Sinne einer verringerten Transluzenz beobachtet werden konnte [74].

### **3.7.2 Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften durch ein Befestigungskomposit**

Die Transluzenz silikatkeramischer Restaurationen gibt bereits Hinweise darauf, dass Farbe und Ästhetik einer Restauration möglicherweise durch den Hintergrund, also die Stumpffarbe oder das Befestigungskomposit beeinflusst werden können [75]. Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über die aktuelle Studienlage gegeben werden.

In einer Untersuchung, in der verschiedene Schichtstärken einer leuzitbasierte Silikatkeramik mit verschiedenen Farbtönen eines Befestigungskomposits auf dunklen Untergründen kombiniert wurden, konnten lediglich marginale ästhetische Verbesserungen erzielt werden, welche jedoch keine klinische Relevanz hatten [76]. Jedoch lag der Schwerpunkt in dieser Untersuchung vornehmlich auf der Abdeckung des dunklen Hintergrundes. Eine Untersuchung mit ähnlichem Studiendesign konnte keine Farbunterschiede in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit ermitteln [77].

Eine weitere Untersuchung aus dem Jahre 2014 beschäftigte sich neben dem Einfluss des Befestigungskomposits auch mit dem Einfluss der Schichtstärke der Keramik. Durch Kombination verschiedener Schichtstärken zwischen 0,5 mm und 1 mm mit verschiedenen Farbtönen eines adhäsiven Befestigungskomposits konnte ein deutlicher Einfluss auf die Farbe der Gesamtrestauration genommen werden. Die Farbunterschiede der Keramik waren bei einer Schichtstärke von 1 mm und der Verwendung des opaken Farbtons des Befestigungskomposits am geringsten und bei einer Schichtstärke von 0,5 mm unter Verwendung des Befestigungskomposits in einem hellen Farbton am deutlichsten. Bei einer Schichtstärke von 1 mm wurden die geringsten Farbunterschiede festgestellt und die Farbe des Hintergrunds konnte maskiert werden [78].

Die optischen Eigenschaften von Befestigungskompositen selbst waren unter anderem Gegenstand einer weiteren Untersuchung, in der verschiedene Bereiche von Restaurationen aus dentalen Keramiken analysiert wurden. Es wurden das zervikale, mittlere und inzisale Drittel von Frontzahnkronen (Farbton A1) nach Befestigung untersucht. Die Schichtstärke reichte je nach Bereich der Restauration von 1,3 mm bis 2 mm. Nach Kombination der Restaurationen mit verschiedenen Farbtönen eines adhäsiven Befestigungskomposits auf verschiedenfarbigen

Stumpfen konnte in keinem der analysierten Bereiche eine Maskierung einer dunklen Stumpffarbe erzielt werden. Die selektive Analyse der Befestigungsmaterialien zeigte, dass identisch angegebene Farbtöne der Befestigungskomposite verschiedener Hersteller teils stark differierende Farb- und Transluzenzwerte aufwiesen, was eine Schwierigkeit der Vergleichbarkeit der optischen Eigenschaften verschiedener Befestigungskomposite aufzeigt [79].

Die bisher genannten Untersuchungen beschäftigen sich überwiegend mit der Maskierung einer dunklen Stumpffarbe und beleuchten nicht einzig den Einfluss des Befestigungskomposits auf die Gesamtfarbe. Daher sollen im Folgenden Untersuchungen dargestellt werden, die sich vermehrt mit diesem selektiven Einfluss des Befestigungskomposits befassen.

So wurde 2013 eine Untersuchung durchgeführt, in der bestimmt werden sollte, ob verschiedene Farbtöne verschiedener Befestigungskomposite die Ästhetik einer silikatkeramischen Restauration negativ beeinflussen können. Zusätzlich wurde der Einfluss der Schichtstärke untersucht. Nach Applikation der Befestigungskomposite in verschiedenen Farbtönen konnten Farbunterschiede in Abhängigkeit vom verwendeten Material detektiert werden. Eine Reduktion der Farbunterschiede konnte durch eine gesteigerte Schichtstärke erzielt werden. Auch in dieser Untersuchung konnte beobachtet werden, dass identisch angegebene Farbtöne der Befestigungskomposite je nach Hersteller differieren [80].

In einer anderen Untersuchung konnte ein Einfluss variierender Farben verschiedener Befestigungskomposite auf die Farbe von silikatkeramischen Prüfkörpern nachgewiesen werden. Die Prüfkörper einer Schichtstärke von 0,6 mm wurden auf dentinfarbenem Untergrund befestigt. In Abhängigkeit vom gewählten Farbton des Befestigungskomposits konnten Farbunterschiede beobachtet werden [81]. Eine weitere Untersuchung beinhaltete neben der Herstellung silikatkeramischer Prüfkörper auch die Herstellung von Prüfkörpern aus verschiedenen Befestigungskompositen in variierenden Farbtönen. Auch hier konnte ein Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits auf die Gesamtfarbe der Silikatkeramik beobachtet werden [82].

Bisher liegen wenige Untersuchungen vor, die sich mit dem selektiven Einfluss des Befestigungskomposits auf die optischen Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen beschäftigen. Die Maskierung eines dunklen Hintergrunds oder der Einfluss der Schichtstärke der Restauration stellen die Schwerpunkte der bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema dar [80, 83, 84].

## 4 Zielsetzung der Dissertation

Ziel der vorliegenden Dissertation war es, die mechanischen und optischen Eigenschaften silikatkeramischer CAD/CAM-Werkstoffe zu untersuchen. Hierzu wurden drei Untersuchungen durchgeführt, im Rahmen derer die folgenden Nullhypothesen überprüft wurden:

1. Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung
  - a. Die Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, die Transluzenzstufe der Blöcke und das Alterungslevel zeigen keinen Einfluss auf Martenshärte, elastischen Eindringmodul, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul, charakteristische Festigkeit, Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe und Farbänderung.
2. Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken
  - a. Zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die nach 100 h hydrothermaler Alterung gemessen wurden, besteht in Bezug auf die biaxiale Biegefestigkeit, den Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit kein Unterschied.
  - b. Zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, besteht in Bezug auf die biaxiale Biegefestigkeit, den Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit kein Unterschied.
  - c. Zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, besteht in Bezug auf die biaxiale Biegefestigkeit, den Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit kein Unterschied.
3. Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken
  - a. Die Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, die Transluzenzstufe der Blöcke und die Farbe des Befestigungskomposits zeigen keinen Einfluss auf Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe, Farbänderung, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul und charakteristische Festigkeit.

## **5 Material und Methoden**

### **5.1 Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung**

#### **5.1.1 Studiendesign**

Um die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung zu untersuchen, wurden sechs silikatkeramische CAD/CAM-Werkstoffe untersucht (Tabelle 1, Abbildung 5): Initial LRF Block (GC Europe, Leuven, Belgien), IPS Empress CAD (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), Amber Mill (Hassbio, Gangwon-do, Südkorea), Celtra Duo (Dentsply Sirona, York, USA), IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent) und n!ce (Straumann, Basel, Schweiz).

**Tabelle 1:** Übersicht der verwendeten CAD/CAM-Silikatkeramiken.

Material		Bezeichnung	Zusammensetzung (Gew.%)	Abkürzung	Hersteller	Farbe	LOT-Nummer
Leuzitbasierte Silikatkeramik		Initial LRF Block	keine detaillierten Informationen verfügbar	IL	GC Europe, Leuven, Belgien	A2 LT	1802191
						A2 HT	1802191
		IPS Empress CAD	SiO <sub>2</sub> : 60-65; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 16-20; K <sub>2</sub> O: 10-14; Na <sub>2</sub> O: 3,5-6,5; andere Oxide: 0,5-7; Pigmente: 0,2-1	EM	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	A2 HT	X18905
Verstärkte Lithiumsilikatkeramiken	Lithiumdisilikatkeramik	Amber Mill	keine detaillierten Informationen verfügbar	AM	Hassbio, Gangwon-do, Südkorea	A2 LT	EBE06KG0401
						A2 HT	EBE06KG0401
	Lithiummetasilikatkeramik	Celtra Duo	SiO <sub>2</sub> : 58; ZrO <sub>2</sub> : 10,1; Li <sub>2</sub> O: 18,5; andere: 13,4	CD	Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland	A2 LT	16003631
						A2 HT	16003462
	Lithiumdisilikatkeramik	IPS e.max CAD	SiO <sub>2</sub> : 57-80; Li <sub>2</sub> O: 11-19; K <sub>2</sub> O: 0-13; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 0-11; ZrO <sub>2</sub> : 0-8; ZnO: 0-8; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0-5; MgO: 0-5; färbende Oxide: 0-8	IC	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	A2 LT	X30245
						A2 HT	X27104
	Lithiumaluminiumsilikatkeramik	n!ce	SiO <sub>2</sub> : 57-80; Li <sub>2</sub> O: 10,5-12,5; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 10,5-11,5; Na <sub>2</sub> O: 1-3; K <sub>2</sub> O: 0-3; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 3-8; ZrO <sub>2</sub> : 0-0,5; CaO: 1-2; färbende Oxide: 0-9	NC	Straumann, Basel, Schweiz	A2 LT	RJ972
						A2 HT	RR733
Befestigungskomposit		Variolink Esthetic DC	Anorganische Füller: 38 vol%; Ytterbiumtrifluorid, sphärische Mischoxide, Initiatoren, Stabilisatoren, Pigmente Monomermatrix: Urethandimethacrylat, andere Methacrylatmonomere	-	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	Light+	X13506
						Warm+	X13483



**Abbildung 5:** CAD/CAM-Blöcke der verwendeten Silikatkeramiken.

Es wurden insgesamt 220 Prüfkörper hergestellt ( $N=220$ ;  $n=40$  pro Keramik) – 20 Prüfkörper der Farbe A2 LT und 20 Prüfkörper der Farbe A2 HT (für IPS Empress CAD nur 20 Prüfkörper A2 LT). Bei der Hälfte der Prüfkörper ( $n=110$ ) wurden initial die Martenshärte, der elastische Eindringmodul und die biaxiale Biegefestigkeit gemessen sowie der Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit berechnet. Die andere Hälfte ( $n=110$ ) wurde nach initialer Transluzenz- und Farbmessung für 100 h der hydrothermalen Alterung zugeführt und anschließend erneut auf Martenshärte, elastischen Eindringmodul, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul, charakteristische Festigkeit, Transluzenz und Farbe untersucht (Abbildung 6).

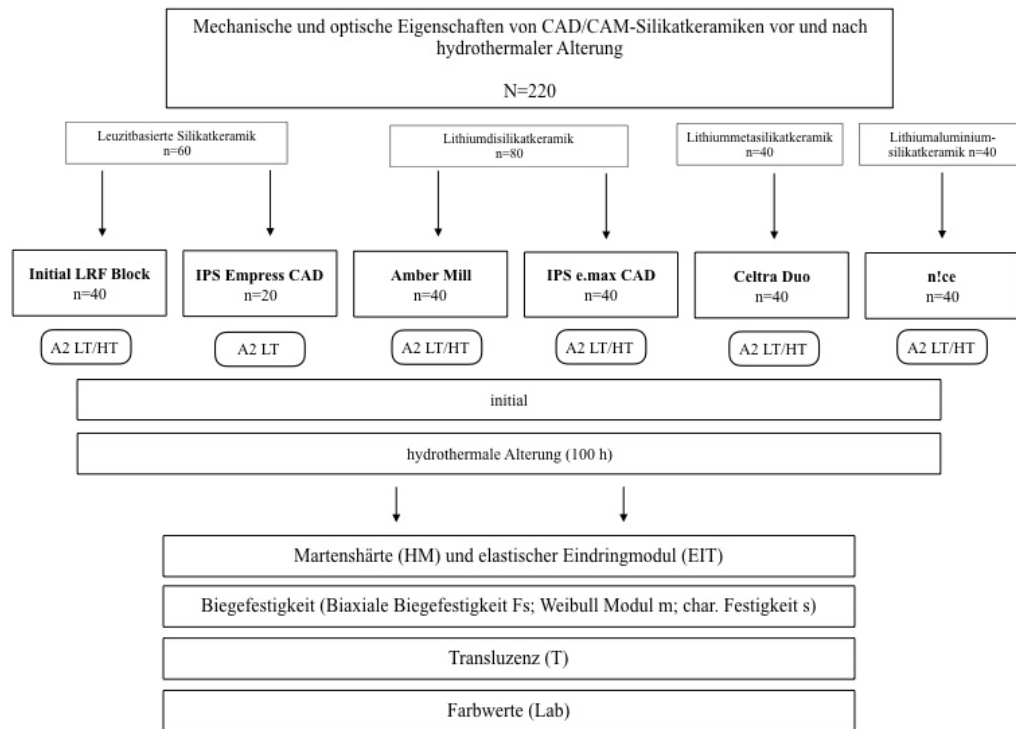


Abbildung 6: Studiendesign.

### 5.1.2 Herstellung der Prüfkörper

Mithilfe einer Computer-gestützten Fräseinheit (Ceramill Motion 2, Amann Girrbach, Pforzheim Deutschland; Abbildung 7) konnten nach Einspeisung eines speziell hierfür konstruierten NC-Datensatzes (NC: numerical control) in die maschineneigene Software (ceramill motion – EST 1274-47.10) Zylinder (Länge: 14 mm, Durchmesser: 12 mm) aus CAD/CAM-Blöcken der entsprechenden CAD/CAM-Silikatkeramiken geschliffen werden. Hierfür wurden Diamantschleifer der Größen 1,0, 1,4 und 1,8 mm verwendet (Diamond 1.0, 1.4, 1.8, Amann Girrbach). Pro Schleifvorgang wurden drei Blöcke in der Maschine auf dem zugehörigen Silikatkeramikhalter positioniert (Abbildung 7).



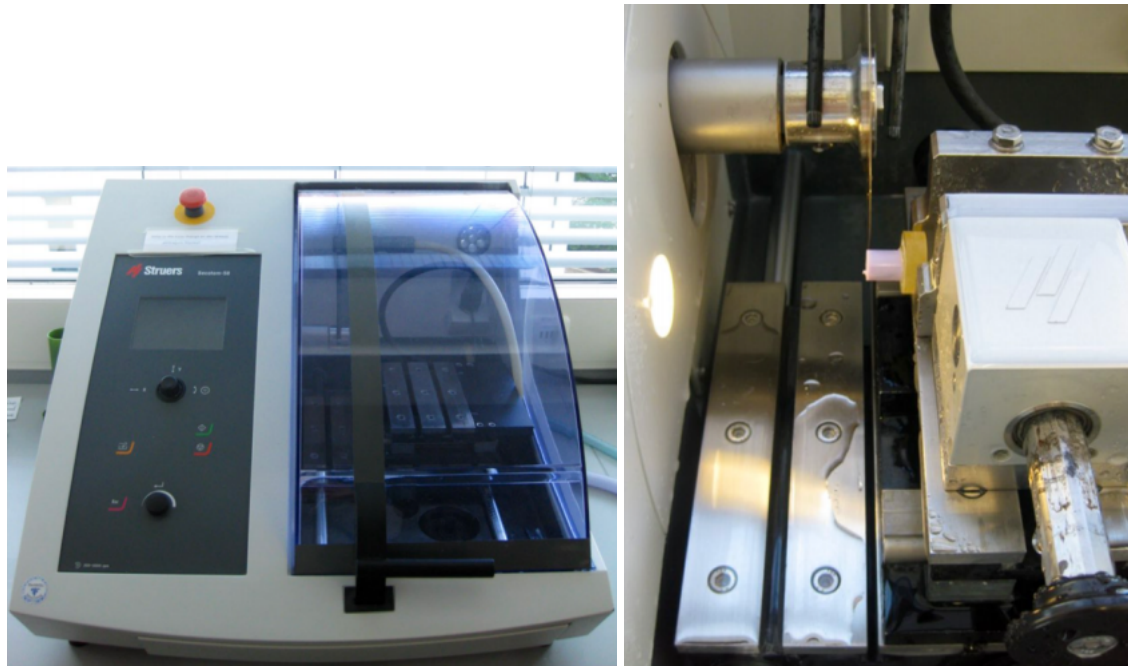


**Abbildung 7:** Links: Ceramill Motion 2 (Amann Girrbach, Pforzheim, Deutschland),  
Rechts: CAD/CAM-Blöcke positioniert im Silikatkeramikhalter.

Die Zylinder wurden im Rahmen des Schleifvorgangs vom Pilz getrennt und für den Schneidevorgang auf Kompositblöcken aufgeklebt, um in der Universalschneidemaschine (Abbildung 8; Secotom-50, Struers, Ballerup, Dänemark) eingespannt werden zu können. Mit der Schneidemaschine wurden mit einer diamantierten Trennscheibe (Größe 127 mm dia. X 0,4 mm, M1D13, Struers) 1,8 mm starke Scheiben von den geschliffenen Zylindern abgetrennt.

Folgende Einstellungen wurden an der Maschine konfiguriert:

Scheibengeschwindigkeit:	3000 U/m
Vorschub:	0,05 mm/s
Trennlänge:	17 mm
Rückkehrposition:	Bleibe
Trennmodus:	Direkter Schnitt
Serienschnitte:	Ein
Probenzahl:	5



**Abbildung 8:** Links: Universalschneidemaschine (Secotom-50, Struers, Ballerup, Dänemark), Rechts: Zylinder vorbereitet für den Schneidevorgang.

Amber Mill, IPS e.max CAD und Celtra Duo wurden nach dem Schneidevorgang nach den Herstellerangaben kristallisiert (Programat S1 1600, Ivoclar Vivadent; Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Brennparameter ausgewählter Keramiken.

Material	Keramik	Bereitschaftstemperatur (°C)	Heizrate (°C/min)	Brenntemperatur (°C)	Haltezeit (min)	Vakuum
Lithiumdisilikat	AM	400	60	LT: 840 HT: 815	15	ja
	IC	403	90	820	10	ja
Lithiummetasilikat	CD	500	60	820	1:30	nein



**Abbildung 9:** Zwischenschritte der Prüfkörperherstellung.

Abbildung 9 bildet den Prozess der Prüfkörperherstellung ab, der ausgehend von einem CAD/CAM-Block über die Herstellung eines Zylinders zur gewünschten scheibenförmigen Prüfkörpergeometrie führte.

Nach dem Schneidevorgang wurden alle Prüfkörper unter Verwendung einer wassergekühlten Schleif- und Poliermaschine (Abramin, Struers) poliert (Abbildung 10).

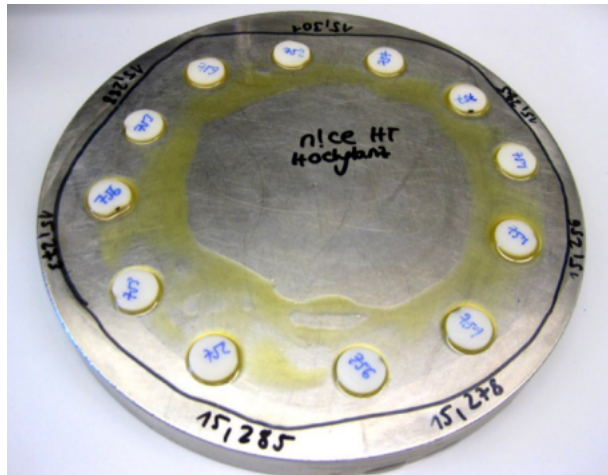


**Abbildung 10:** Schleif- und Poliermaschine (Abramin, Struers).



**Abbildung 11:** Digitale Messschraube (Mitutoyo, Andover, England).

Die Politur erfolgte mit Diamantschleifscheiben der Körnung 40  $\mu\text{m}$  und 20  $\mu\text{m}$ , Magnetic Disc Schleifscheiben der Körnung 9  $\mu\text{m}$  und 3  $\mu\text{m}$  sowie einer Polierscheibe mit einer Körnung von 1  $\mu\text{m}$  unter Verwendung der zugehörigen DiaPro Diamant- und Poliersuspensionen (alle der Firma Struers). Außerdem wurden bei Keramiken mit einer höheren Festigkeit SiC Schleifpapier und SiC Folien der Körnungen P500 bis P2000 verwendet. Zunächst wurden die Prüfkörper mit einer digitalen Mikrometerschraube (Abbildung 11; Mitutoyo, Andover, England) gemessen und auf einer Trägerplatte fixiert. Die Fixierung erfolgte mithilfe von Wachs nach Erhitzen der Trägerplatte (Abbildung 12). Nach Abkühlen wurde die Trägerplatte in die Poliermaschine eingespannt. Durch stetiges Kontrollieren mittels digitaler Messschraube konnte durch eine schrittweise Reduktion der Schichtstärke die gewünschte Dicke von  $0,95 \pm 0,03 \text{ mm}$  erreicht werden. Nach erneutem Erhitzen der Trägerplatte, wurden die Prüfkörper in erwärmtem Orangenöl (Orange Solvent, Orbis Multident, Oldenburg, Deutschland) und Ethanol (Alkopharm 80, Brüggemann Alkohol, Heilbronn, Deutschland) gereinigt und getrocknet.



**Abbildung 12:** Trägerplatte mit den in Wachs befestigten Prüfkörpern

### 5.1.3 Hydrothermale Alterung

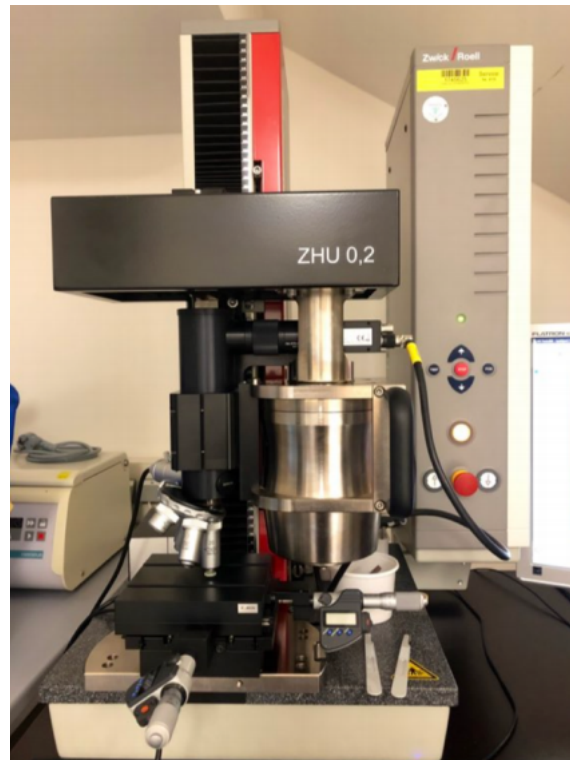
Für die hydrothermale Alterung wurden 110 Prüfkörper ( $n=10$ ) für 100 h in einem Autoklav (Euroklav 29-S, Melag, Berlin, Deutschland) positioniert ( $134^\circ$ , 2 bar).

### 5.1.4 Methoden

Alle Messungen der im Folgenden beschriebenen Methoden wurden bei Raumtemperatur und unter trockenen Bedingungen durchgeführt.

#### 5.1.4.1 Bestimmung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls

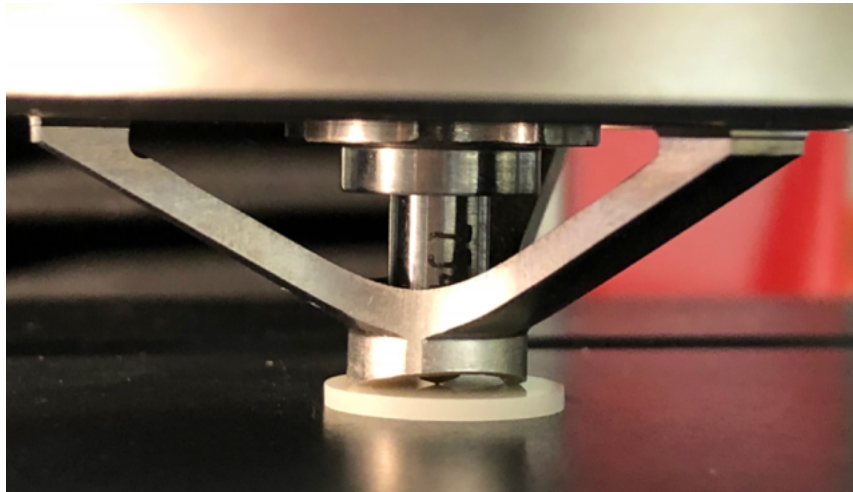
Bei 110 Prüfkörpern erfolgte eine initiale Prüfung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls, bei weiteren 110 Prüfkörpern erfolgte die Messung nach 100 h hydrothermalen Alterung in einem Autoklav. Definiert ist die Martenshärte als das Verhältnis von Maximalkraft zu Kontaktfläche. Die Messungen erfolgten entsprechend der Vorgaben der Prüfnorm DIN EN ISO 14577 nach dem Starten der maschineneigenen Software (testXpert, ZwickRoell, Ulm, Deutschland).



**Abbildung 13:** Universalprüfmaschine ZHU zur Messung der Martenshärte. (ZHU 0,2, ZwickRoell, Ulm, Deutschland).

Nach Positionierung eines Prüfkörpers in der Maschine wurde mithilfe des Mikroskops bei einer Vergrößerung von 1:20 sichergestellt, dass er korrekt positioniert war. Anschließend wurde vom Mikroskop auf den Härtemesskopf umgeschwenkt (Abbildung 13). Nach dem Starten des Messvorgangs senkte sich Härtemesskopf mit konstanter Geschwindigkeit (0,1 mm/min) bis auf den Prüfkörper ab, sodass schließlich der pyramidenförmige Diamant-Eindringkörper ( $\alpha=136^\circ$ ) in Kontakt mit dem Prüfkörper treten konnte. Die Messung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls erfolgte hierbei durchgehend, d. h. sowohl während der Be- als auch während der Entlastung. Bei Erreichen der maximalen Prüfkraft (9,807 N) wurde diese für 10 sek gehalten und danach wieder verringert. Nach erneutem Umschwenken auf das Lichtmikroskop konnte die Impression auf dem Prüfkörper nachvollzogen werden. Die geprüfte Seite wurde mit einem wasserfesten Stift markiert, um für die anschließende Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit dieselbe Seite verwenden zu können (Abbildung 14).





**Abbildung 14:** Messung der Martenshärte.

Errechnet wurden die Martenshärte (HM) und der elastische Eindringmodul (EIT) wie folgt:

$$HM = F/A_s(h)$$

**HM:** Martenshärte [N/mm<sup>2</sup>]

**F:** Testkraft [N]

**A<sub>s</sub> (h):** Oberfläche des Diamant-Eindringkörpers im Abstand h von der Spitze,  $26,43 \times h^2$  [mm<sup>2</sup>]

$$EIT = (1 - \nu_s^2) \left( \frac{2\sqrt{A_P(h_c)}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right)^{-1}$$

**EIT:** Elastischer Eindringmodul [kN/mm<sup>2</sup>]

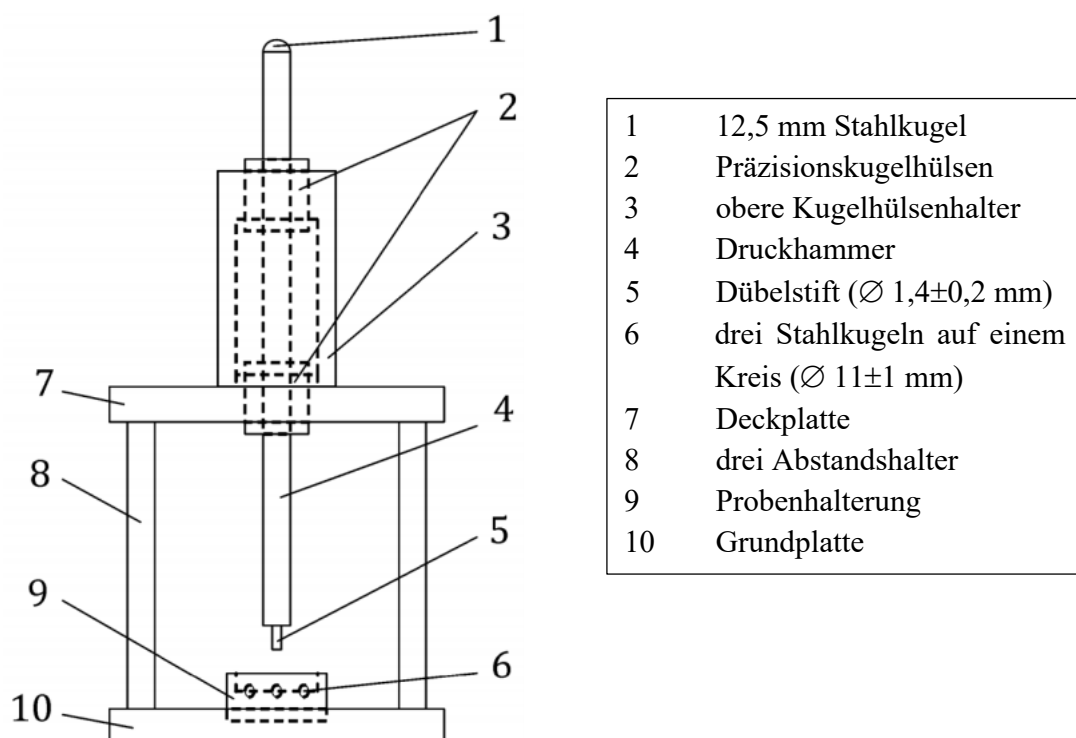
**ν<sub>s</sub>:** Poisson'sches Verhältnis der Prüfkörper

**ν<sub>i</sub>:** Poisson'sches Verhältnis des Eindringkörpers

#### 5.1.4.2 Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit

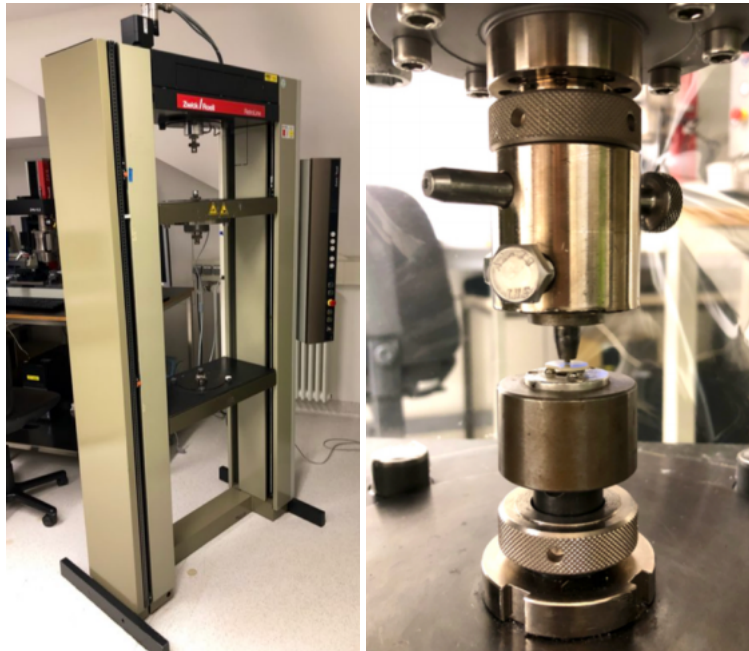
Die Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit erfolgte bei allen Prüfkörpern ( $N=220$ ). Nach den Vorgaben der Prüfnorm DIN EN ISO 6872 wurden nach dem Starten der maschineneigenen Software (testXpert, ZwickRoell) an der Maschine (Universalprüfmaschine 1445 Zwick/Roell, ZwickRoell; Abbildung 16) eine Vorkraft von 0,1 MPa und eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min konfiguriert.

Zu Beginn der Messung wurde die Schichtstärke eines jeden Prüfkörpers dokumentiert. Die Messung erfolgte zentral in dem Bereich der Prüfkörpers, in dem später der Prüfstempel zum Liegen kam. Die markierte Seite, die bereits bei der Martensprüfung verwendet worden war, wurde in der Maschine in Richtung des Prüfstempels platziert. Die Prüfkörper wurden mithilfe des passenden Probenhalters mittig unterhalb des Prüfstempels (Durchmesser  $1,4\pm0,2$  mm) und auf drei Stahlkugeln (Durchmesser  $4,5\pm0,2$  mm) positioniert (Abbildung 16). Die Anordnung der Stahlkugeln im Probenhalter gab einen Kreis (Durchmesser  $11\pm1$  mm) wieder, auf welchem die Kugeln mit einem Abstand von  $120^\circ$  angeordnet waren. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist Abbildung 15 zu entnehmen.



**Abbildung 15:** Schematischer Versuchsaufbau: Messung der biaxialen Biegefestigkeit (Abbildung modifiziert nach [36]).





**Abbildung 16:** Links → Universalprüfmaschine (1445 Zwick/Roell, ZwickRoell),  
Rechts → Prüfkörper unmittelbar vor der Messung.

Nach dem Starten des Messvorgangs in der Software senkte sich der Prüfstempel mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min in Richtung des Prüfkörpers ab, bis dieser frakturierte. Die Durchführung erfolgte unter Verwendung einer Messdose, die für Kräfte bis 10 kN vorgesehen war.

Mithilfe der folgenden Formel wurde unter Einbeziehung der Dimensionen des Prüfkörpers die Biegefestigkeit  $\sigma$  [MPa] berechnet:

$$\sigma = -0,2387 P (X-Y)/b^2$$

**$\sigma$ :** Maximale Zugspannung in der Mitte [MPa]

**P:** Beim Bruch gemessene Gesamtkraft [N]

$$X = (1+\nu) \ln(r_2/r_3)^2 + [(1-\nu)/2](r_2/r_3)^2$$

$$Y = (1+\nu)[1 + \ln(r_1/r_3)^2] + (1-\nu)(r_1/r_3)^2$$

**$\nu$ :** Poisson'sche Querkontraktionszahl

**$r_1$ :** Radius des Unterstützungskreises [mm]

**$r_2$ :** Radius des belasteten Bereichs [mm]

**$r_3$ :** Radius des Prüfkörpers [mm]

**b:** Dicke des Prüfkörpers [mm]

Die Ermittlung des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit erfolgte mithilfe einer Vorlage in Microsoft Excel [42].

Ein Nachteil dieser Messmethode besteht darin, dass es kaum möglich ist, die Lastverteilung unterhalb des Prüfstempel exakt gleichmäßig zu halten, weshalb es teilweise zur Streuung der Messwerte kommen kann [38]. Dieser Fehler kann durch eine Markierung in der Mitte des Prüfkörpers mit einem wasserfesten Stift reduziert werden. Die Markierung sollte anschließend möglichst genau mittig unterhalb des Prüfstempels positioniert werden. Eine hohe Streuung der Messwerte ist bei Erhebung der biaxialen Biegefestigkeit bei spröden Werkstoffen wie z. B. Keramiken zu beobachten. Durch nicht sichtbare Mikrorisse in der Keramik, die im Rahmen der Verarbeitung entstehen können, kann es zu einem verfrühten Versagen des Werkstoffs oder einer Fraktur im Randbereich des Prüfkörpers kommen [18]. Das Risiko einer erhöhten Streuung steigt generell mit einer kleineren Stichprobengröße. Durch eine erhöhte Anzahl an Prüfkörpern kann einer Streuung der Messwerte entgegengewirkt werden. In der Prüfnorm DIN EN ISO 6872:2019 wird daher empfohlen, die Messung mit mindestens zehn, besser jedoch mit 30 Prüfkörpern pro Gruppe durchzuführen.

### 5.1.4.3 Bestimmung der Transluzenz und der Farbwerte

Für die Transluzenz-Messungen sowie für die Messungen der Farbwerte (Lab) wurde ein UV/Vis Spektrophotometer (Abbildung 17) mit integrierter Ulbrichtkugel mit Bariumsulfatstandard (Lambda 35) verwendet. Nach dem Starten der geräteeigenen Software (PerkinElmer UV WinLab, PerkinElmer) wurde zunächst sichergestellt, dass der Lichtstrahl mittig durch den Prüfkörper fällt. Dieser Überprüfung schloss sich eine Kalibrierung des Geräts an, sodass die Transluzenz anschließend mit 100% angegeben wurde. Folgende Einstellungen wurden am Gerät gewählt: Start: 700 nm, End: 400 nm; Ordinate mode: %T, Slit width: 2 nm, Scan speed: 480, Data interval: 1 nm, Number of cycles: 1, Lamp change at: 326.

Im festgelegten Intervall wurde nun zuerst die Intensität des monochromatischen Lichts  $I_0$  und des Lichts  $I$ , welches durch den Prüfkörper durchstrahlte, bei Licht der Wellenlänge 400 nm bis 700 nm  $[\lambda]$  gemessen. Anschließend ermittelte die Software mithilfe der Gleichung  $I/I_0 = t_c \times$  den Übertragungskoeffizienten  $t_c$  [%]. Die Lichttransmission, also die Transluzenz (%T), der Prüfkörper wurde durch Integration ( $t_c(\lambda) d\lambda [10^{-5}]$ ) aller  $t_c$ -Werte errechnet. Nach Dividierung durch den Ausgangswert, der nach Kalibrierung des Geräts ermittelt worden war, konnte die Lichttransmission in % bestimmt werden. Der ermittelte Wert der Lichttransmission erlaubt eine Aussage darüber, ob ein Prüfkörper eine hohe oder niedrige Transluzenz aufweist, wobei ein Wert von 100% für eine vollständige Transluzenz und ein Wert von 0% für eine vollständige Opazität sprechen würde.

Durch Einspeisen der Daten aus der Software des Spektrophotometers in ein weiteres zugehöriges Programm (Color Application Software V1.00, PerkinElmer Inc.), konnten im Anschluss an die Bestimmung der Transluzenz die Farbwerte (Lab) bestimmt werden. Unter Verwendung der Formel

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

konnten in einer Excel-Tabelle das  $\Delta E$  ermittelt werden. Die Berechnung erfolgte über die Ermittlung des euklidischen Abstandes, also den Abstand mehrerer Koordinaten innerhalb eines mindestens dreidimensionalen Koordinatensystems. Vorgeschrieben wird die Vorgehensweise durch die Prüfnorm DIN EN ISO 11664-4 [54]. Die Ermittlung der Transluzenzänderung erfolgte ebenfalls über eine Excel-Tabelle. Die Ermittlung des initialen Farbwerts erfolgte unter Einbeziehung der Farbwerte L, a und b mithilfe der Formel:

$$E_{\text{Lab initial}} = \sqrt{L^2 + a^2 + b^2}$$



Abbildung 17: Spektrophotometer (Lambda 35, PerkinElmer LAS, Waltham, USA).

## 5.2 Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken

### 5.2.1 Studiendesign

Um die Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken zu untersuchen, wurden sechs silikatkeramische CAD/CAM-Werkstoffe verwendet (Tabelle 1, Abbildung 5): Initial LRF Block (GC Europe), IPS Empress CAD (Ivoclar Vivadent), Amber Mill (Hassbio), Celtra Duo (Dentsply Sirona), IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent) und n!ce (Straumann).

Es wurden insgesamt 440 Prüfkörper hergestellt ( $N=440$ ;  $n=80$  pro Keramik) – 40 Prüfkörper der Farbe A2 LT und 40 Prüfkörper der Farbe A2 HT (für IPS Empress CAD nur 20 Prüfkörper A2 LT). 110 Prüfkörper wurden initial hinsichtlich biaxialer Biegefestigkeit, Weibull Modul und charakteristischer Festigkeit untersucht, während weitere 110 Prüfkörper nach hydrothermalen Alterung (100 h) und 220 Prüfkörper nach Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits (Variolink Esthetic DC, Ivoclar Vivadent) in den Farben Light+ (LOT-Nummer: X13506) und Warm+ (LOT-Nummer: X13483) geprüft wurden (Abbildung 18). Die verschiedenen Kombinationen aus Transluzenzstufe und Befestigungsmaterial ergaben pro CAD/CAM-Silikatkeramik vier Gruppen:

- a) 10 Prüfkörper der Farbe A2 LT + Befestigungskomposit Light+
- b) 10 Prüfkörper der Farbe A2 LT + Befestigungskomposit Light+
- c) 10 Prüfkörper der Farbe A2 HT + Befestigungskomposit Warm+
- d) 10 Prüfkörper der Farbe A2 HT + Befestigungskomposit Warm+

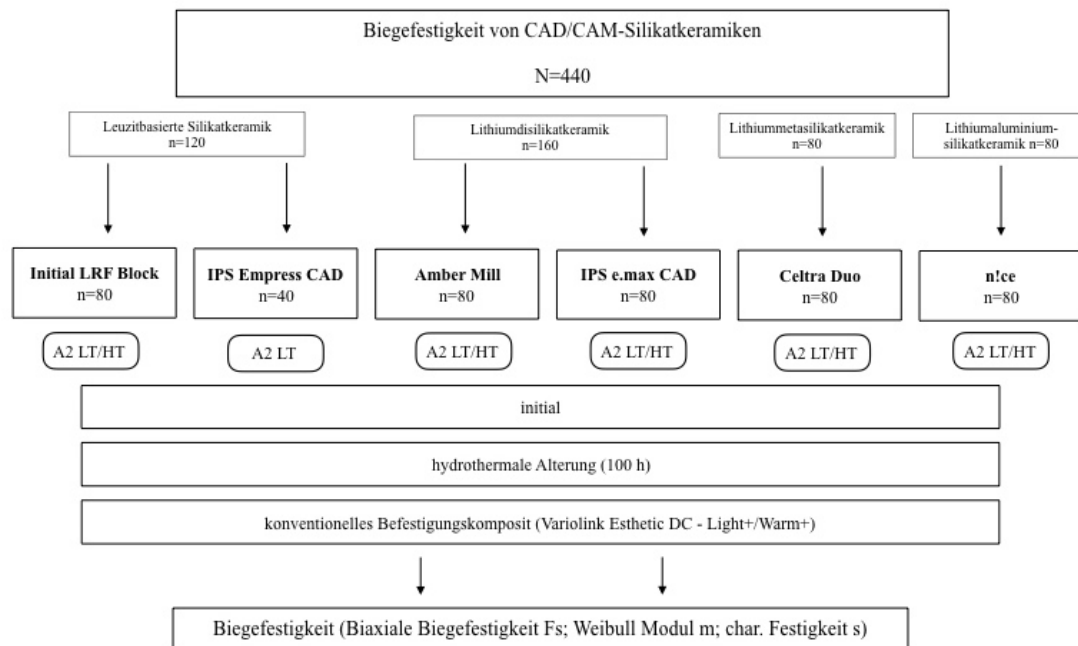


Abbildung 18: Studiendesign.

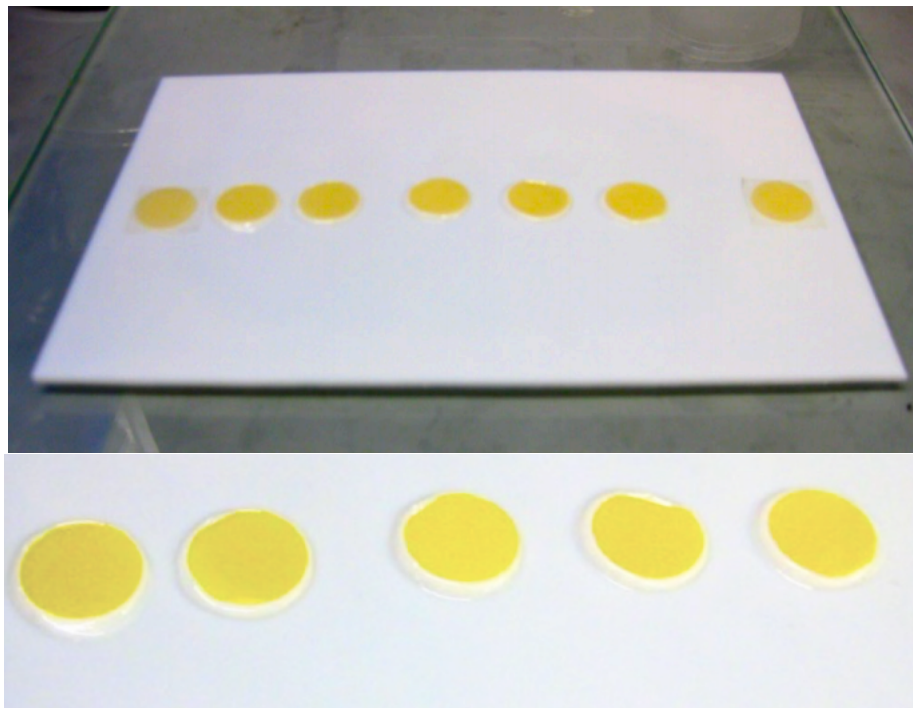
### 5.2.2 Herstellung der Prüfkörper

Da die Herstellung der Prüfkörper weitgehend mit der des Studiendesigns 1 übereinstimmt, wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.1.2 verwiesen.

### 5.2.3 Aufbringen des Befestigungskomposits

Prüfkörper, die mit Befestigungskomposit versehen wurden, wurden nur einseitig auf Hochglanz poliert. Um die Prüfkörper mit dem Befestigungskomposit zu versehen, wurde eine Vorrichtung verwendet (Abbildung 19). Diese setzte sich wie folgt zusammen: Als Unterlage diente eine 1 mm starke Teflonfolie, die auf eine Glasplatte geklebt wurde, um einen stabilen und nicht nachgiebigen Untergrund zu garantieren. Hierbei machte man sich die Eigenschaft des Teflon zunutze, dass es keinen Haftverbund ausbildet. Auf die Teflonfolie wurden mit doppelseitigem Klebeband links und rechts zwei Prüfkörper geklebt. Anschließend wurden die Prüfkörper nach Herstellerangaben mit 9%iger Flußsäure (Porcelain Etch, Ultradent, Brunthal, Deutschland) angeätzt, abgespült und anschließend für eine Minute im Ultraschallbad mit destilliertem Wasser gereinigt. Das Befestigungskomposit (entweder Light+

bzw. Warm+) wurde auf der Teflonfolie platziert und die Prüfkörper mit der angeätzten Seite nach unten auf das Befestigungskomposit gelegt. Nun wurde eine zweite, größere Glasplatte von oben aufgelegt, sodass die Prüfkörper möglichst gleichmäßig in das Befestigungskomposit gedrückt wurden. Sobald die Glasplatte einmal auf den links und rechts aufgebrachten Prüfkörpern anschluss, wurde sie wieder heruntergenommen. Durch die Schichtstärke des doppelseitigen Klebebandes (0,08 mm), mit dem die Prüfkörper (0,95 mm) links und rechts aufgeklebt worden waren, konnte diese Schichtstärke für das Befestigungskomposit auf den Prüfkörpern eingehalten werden. Die Lichthärtung erfolgte zunächst für 20 sek zentral auf jedem Prüfkörper (Polymerisationslampe Elipar™ E10, 3M, Seefeld, Deutschland). Anschließend wurde im Randbereich jedes Prüfkörpers sechsmal für etwa 20 sek nachgehärtet. Nach dem Aufbringen des Befestigungskomposits wurden die Prüfkörper für drei Tage bei 37°C im Brutschrank gelagert, um eine vollständige Polymerisation des Befestigungskomposits zu gewährleisten (angelehnt an Prüfnorm: DIN EN ISO 4049:2019 [85]).



**Abbildung 19:** Vorrichtung zum Aufbringen des Befestigungskomposits.

### 5.3 Methoden

Die Prüfung der biaxialen Biegefestigkeit wird in Kapitel 5.1.4.2 erläutert.

## **5.4 Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken**

### **5.4.1 Studiendesign**

Um den Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die optischen und mechanischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken zu untersuchen, wurden sechs silikatkeramische CAD/CAM-Werkstoffe verwendet (Tabelle 1, Abbildung 5): Initial LRF Block (GC Europe), IPS Empress CAD (Ivoclar Vivadent), Amber Mill (Hassbio), Celtra Duo (Dentsply Sirona), IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent) und n!ce (Straumann). Als konventionelles Befestigungskomposit wurde Variolink Esthetic DC (Ivoclar Vivadent) in den Farben Light+ (LOT-Nummer: X13506) und Warm+ (LOT-Nummer: X13483) verwendet.

Es wurden insgesamt 220 Prüfkörper hergestellt (N=220; n=40 pro Keramik) – 20 Prüfkörper der Farbe A2 LT und 20 Prüfkörper der Farbe A2 HT (für IPS Empress CAD nur 20 Prüfkörper A2 LT). Die Prüfkörper wurden initial hinsichtlich der Transluzenz und der Farbe untersucht. Anschließend erfolgte das Aufbringen des Befestigungskomposits. Die verschiedenen Kombinationen aus Transluzenzstufe und Befestigungsmaterial ergaben pro CAD/CAM-Silikatkeramik vier Gruppen:

- a) 10 Prüfkörper der Farbe A2 LT + Befestigungskomposit Light+
- b) 10 Prüfkörper der Farbe A2 LT + Befestigungskomposit Light+
- c) 10 Prüfkörper der Farbe A2 HT + Befestigungskomposit Warm+
- d) 10 Prüfkörper der Farbe A2 HT + Befestigungskomposit Warm+

Nach dem Aufbringen des Befestigungskomposits erfolgte eine erneute Transluzenz- und Farbmessung sowie die Prüfung der biaxialen Biegefestigkeit, des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit (Abbildung 20).

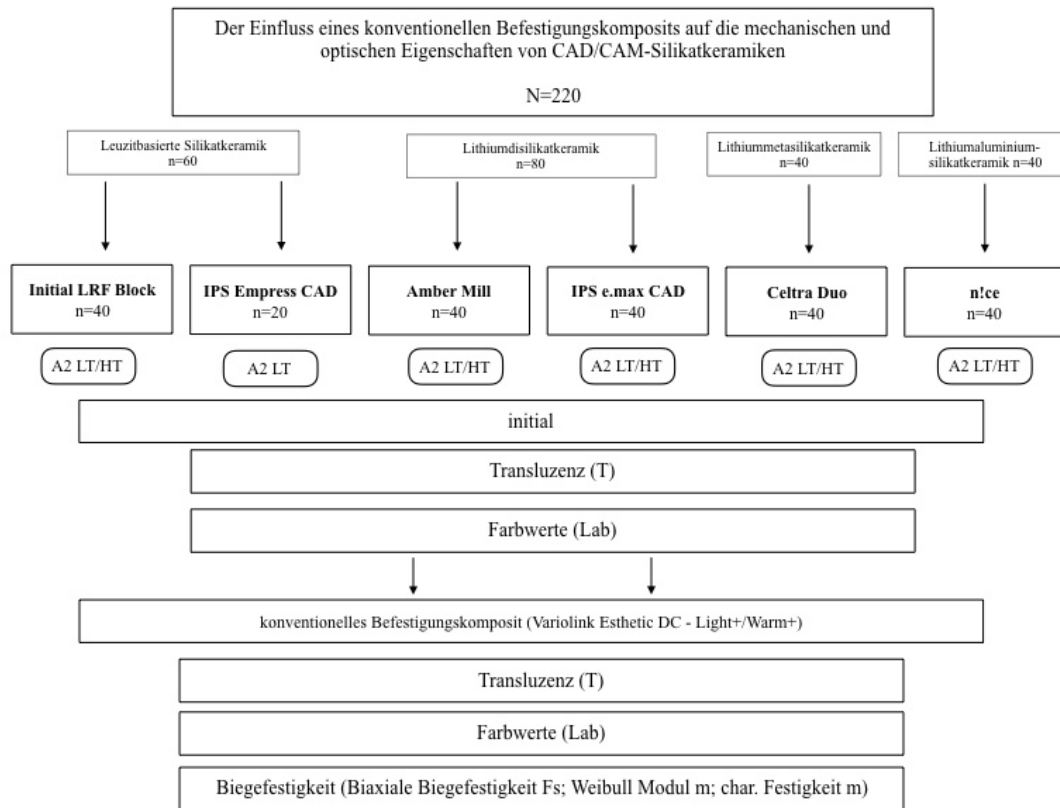


Abbildung 20: Studiendesign.

### 5.4.2 Herstellung der Prüfkörper

Da die Herstellung der Prüfkörper weitgehend mit der des Studiendesigns 1 und 2 übereinstimmt, wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.1.2 und 5.2.3 verwiesen.

## 5.5 Methoden

Für die Methoden wird auf die Kapitel 5.1.4.1, 5.1.4.2 und 5.1.4.3 verwiesen.



## 6 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurden die in Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) dokumentierten Daten in das Statistikprogramm SPSS IBM 25.0 (IBM SPSS Statistics, Armonk, New York, USA) eingelesen. Zunächst wurde eine explorative Datenanalyse inklusive eines Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung durchgeführt. Für die parametrische Auswertung wurden der deskriptiven Statistik Mittelwert, Standardabweichung sowie das 95%-Konfidenzintervall entnommen, während für die nicht-parametrische Auswertung Median, Minimum und Maximum hinzugezogen wurden. Mithilfe des Univariats konnten jeweils der Einfluss der CAD/CAM-Silikatkeramik, der Transluzenzstufe, des Befestigungskomposits, der Alterung oder Interaktionen zwischen den genannten Variablen auf jede der genannten Messgrößen bestimmt werden. Die Bestimmung des partiellen Eta-Quadrats ( $\eta_p^2$ ) erlaubte eine Schätzung der Effektgröße und damit eine Aussage darüber, welche Variable den größten Einfluss hatte.

Für die parametrische Auswertung wurden der t-Test für unabhängige Stichproben und die unifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Außerdem wurde der Post-hoc-Test nach Scheffé durchgeführt.

Die nicht-parametrische Auswertung erfolgte mithilfe des Kruskal-Wallis- und des Mann-Whitney-U-Tests inklusive einer Bonferroni-Korrektur.

Die parametrische Bestimmung des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit erfolgten mithilfe einer Vorlage in Microsoft Excel [42]. Durch die in der Vorlage enthaltene Regressionsanalyse konnten nach dem Einfügen der Festigkeitswerte für eine bestimmte Gruppe der Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit ermittelt werden.

Alle Analysen wurden bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha=0,05$  durchgeführt.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung

#### 7.1.1 Martenshärte und elastischer Eindringmodul

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik (HM:  $\eta_p^2=0,486$ ;  $p<0,001$ ; EIT:  $\eta_p^2=0,665$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt vom Alterungslevel (HM:  $\eta_p^2=0,069$ ;  $p<0,001$ ; EIT:  $\eta_p^2=0,058$ ;  $p=0,001$ ) und der Transluzenzstufe (HM:  $\eta_p^2=0,050$ ;  $p=0,001$ ; EIT:  $\eta_p^2=0,048$ ;  $p=0,002$ ) die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul am stärksten (für EIT war der Einfluss der nachfolgenden Interaktion größer). Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe (HM:  $\eta_p^2=0,055$ ;  $p=0,024$ ; EIT:  $\eta_p^2=0,065$ ;  $p=0,010$ ) war ebenfalls signifikant.

Die gemessenen HM- (27,3%) und EIT- (18,2%) Werte zeigten eine Abweichung von der Normalverteilung und wurden somit nichtparametrisch ausgewertet (Tabelle 4).

##### 7.1.1.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der LT-Blöcke zeigte Celtra Duo mit IPS e.max CAD ( $p=0,162$ ) die höchsten Werte der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls ( $p\leq 0,019$ ), während Initial LRF Block und IPS Empress CAD ( $p=0,762$ ) zur Gruppe mit den niedrigsten Werten ( $p\leq 0,001$ ) zählten (Tabelle 3, Tabelle 4). IPS e.max CAD lag weiterhin im gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $p=0,880$ ) und n!ce ( $p=0,364$ ). Des Weiteren lagen die Werte der Martenshärte von Amber Mill im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $p=0,082$ ) und IPS e.max CAD ( $p=0,880$ ; Tabelle 3). Die Silikatkeramik n!ce lag hinsichtlich des EIT im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $p=0,500$ ) und IPS e.max CAD ( $p=0,273$ ; Tabelle 4).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zählten Celtra Duo, IPS e.max CAD, Amber Mill und n!ce ( $p\leq 0,821$ ) zur Gruppe mit der höchsten Martenshärte ( $p\leq 0,001$ ; Tabelle 3). Initial LRF Block zeigte hier die geringsten Werte der Martenshärte ( $p\leq 0,001$ ). Hinsichtlich des EIT zählten ebenfalls Celtra Duo und IPS e.max CAD ( $p=0,199$ ) zur Gruppe mit den höchsten Werten ( $p\leq 0,002$ ). IPS e.max CAD zählte außerdem gemeinsam mit Amber Mill ( $p=0,016$ ) und Celtra

Duo ( $p=0,010$ ) zum zweithöchsten Wertebereich ( $p\leq 0,002$ ). Amber Mill und n!ce ( $p=0,406$ ) zählten zur Gruppe mit den dritthöchsten Werten ( $p\leq 0,002$ ). Initial LRF Block wies die geringsten Werte auf ( $p\leq 0,001$ ; Tabelle 4).

Nach der hydrothermalen Alterung konnten innerhalb der Transluzenzstufe LT für Amber Mill, Celtra Duo, IPS e.max CAD und n!ce ( $p\leq 0,940$ ) die höchsten Werte für die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul ermittelt werden ( $p\leq 0,003$ ). Initial LRF Block und IPS Empress CAD ( $p=0,514$ ) zur Gruppe mit den geringsten Werten zählten ( $p\leq 0,003$ ; Tabelle 3).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT konnten für Celtra Duo und IPS e.max CAD ( $p=0,174$ ) die höchsten ( $p\leq 0,001$ ) und für Initial LRF Block ( $p\leq 0,001$ ) die geringsten Werte ermittelt werden. Außerdem lag die Martenshärte von n!ce im gleichen Wertebereich wie die von Celtra Duo ( $p=0,174$ ) und IPS e.max CAD ( $p=0,940$ ). Weiterhin gehörten Amber Mill und n!ce hinsichtlich der Martenshärte zum gleichen Wertebereich ( $p=0,082$ ). Der elastische Eindringmodul von n!ce und IPS e.max CAD lag im gleichen Wertebereich ( $p=0,151$ ), während Amber Mill ( $p\leq 0,034$ ) signifikant geringere Werte aufwies (Tabelle 3, Tabelle 4).

**Tabelle 3:** Deskriptive Statistiken – Martenshärte [N/mm<sup>2</sup>]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	2600±506	2237;2962	1265	2797 <sup>*a,z,Z</sup>	2899
	HT	2468±336	2227;2709	2012	2390 <sup>A,z,Z</sup>	2879
EM	LT	2631±304	2413;2849	2161	2607 <sup>a,Z</sup>	3002
AM	LT	3717±529	3338;4097	2999	3638 <sup>bc,z,Z</sup>	4349
	HT	3213±516	2843;3583	2781	2958 <sup>*B,y,Z</sup>	4156
CD	LT	4109±539	3723;4496	3373	4201 <sup>*c,z,Z</sup>	4678
	HT	4053±694	3555;4550	2850	4499 <sup>*B,z,Z</sup>	4636
IC	LT	3710±622	3264;4156	2863	3828 <sup>*bc,z,Z</sup>	4329
	HT	3513±438	3199;3828	2863	3487 <sup>B,z,Z</sup>	4044
NC	LT	3358±493	3204;3912	2721	3434 <sup>b,z,Z</sup>	4229
	HT	3140±403	2851;3430	2531	3112 <sup>B,y,Z</sup>	3933
Hydrothermale Alterung (100 h)						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	2306±323	2075;2538	1938	2320 <sup>a,z,Y</sup>	2815
	HT	2256±469	1920;2592	1802	2005 <sup>*A,z,Z</sup>	2825
EM	LT	2448±428	2118;2778	1880	2612 <sup>a,Z</sup>	2898
AM	LT	3498±582	3081;3916	2751	3344 <sup>b,z,Z</sup>	4313
	HT	2629±719	2113;3145	1904	2317 <sup>B,y,Z</sup>	3677
CD	LT	3520±658	3048;3992	2629	3402 <sup>b,z,Y</sup>	4397
	HT	3564±696	3067;4062	2351	3546 <sup>C,z,Z</sup>	4451
IC	LT	3185±665	2708;3662	2245	3173 <sup>b,z,Z</sup>	4242
	HT	3276±539	2889;3663	2379	3156 <sup>C,z,Z</sup>	4000
NC	LT	3621±551	3326;4016	2214	3772 <sup>b,z,Z</sup>	4143
	HT	3243±562	2839;3646	2335	3145 <sup>BC,z,Z</sup>	4117

Nicht normalverteilte Gruppen sind mit \* markiert. Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

**Tabelle 4:** Deskriptive Statistiken – Elastischer Eindringmodul [kN/mm<sup>2</sup>]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	45,0±6,80	40,1;50,0	27,4	47,7 <sup>*a,z,Z</sup>	49,5
	HT	43,2±4,68	39,7;46,6	36,7	41,8 <sup>A,z,Z</sup>	49,2
EM	LT	44,4±5,04	40,7;48,1	36,1	43,3 <sup>a,Z</sup>	50,8
AM	LT	70,9±8,73	64,6;77,3	60,8	69,1 <sup>b,z,Z</sup>	81,7
	HT	62,3±8,90	55,8;68,8	54,8	58,1 <sup>*B,y,Z</sup>	78,6
CD	LT	80,5±8,81	74,1;86,9	69,3	80,4 <sup>bc,z,Z</sup>	92,7
	HT	77,5±13,4	67,8;87,2	56,4	85,8 <sup>*B,z,Z</sup>	89,8
IC	LT	73,2±13,6	63,4;83,0	54,1	73,8 <sup>bc,z,Z</sup>	90,0
	HT	70,4±7,46	64,9;75,8	59,9	67,8 <sup>C,z,Z</sup>	82,1
NC	LT	65,9±7,56	60,4;71,4	54,1	64,4 <sup>c,z,Z</sup>	76,6
	HT	58,3±5,34	54,4;62,2	49,5	58,7 <sup>C,y,Z</sup>	68,8
Hydrothermale Alterung (100 h)						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	40,6±4,27	37,4;43,7	35,4	41,3 <sup>a,z,Y</sup>	47,5
	HT	40,0±6,67	35,1;44,9	33,6	36,3 <sup>*A,z,Z</sup>	48,6
EM	LT	42,4±4,97	38,4;46,3	34,9	45,0 <sup>a,Z</sup>	47,5
AM	LT	66,6±9,51	59,7;73,5	55,0	64,1 <sup>b,z,Z</sup>	80,0
	HT	51,1±7,85	45,4;56,8	40,9	49,6 <sup>B,y,Y</sup>	64,3
CD	LT	71,3±11,1	63,2;79,3	55,5	70,5 <sup>b,z,Y</sup>	86,5
	HT	72,5±11,4	64,2;80,8	54,2	74,8 <sup>C,z,Z</sup>	86,0
IC	LT	63,5±12,9	54,2;72,8	47,0	62,2 <sup>b,z,Z</sup>	86,3
	HT	67,7±11,4	59,4;75,9	50,0	66,7 <sup>CD,z,Z</sup>	84,2
NC	LT	66,2±9,01	59,6;72,7	43,2	68,5 <sup>b,z,Z</sup>	75,6
	HT	60,6±8,81	54,2;67,0	45,9	59,6 <sup>D,z,Z</sup>	74,2

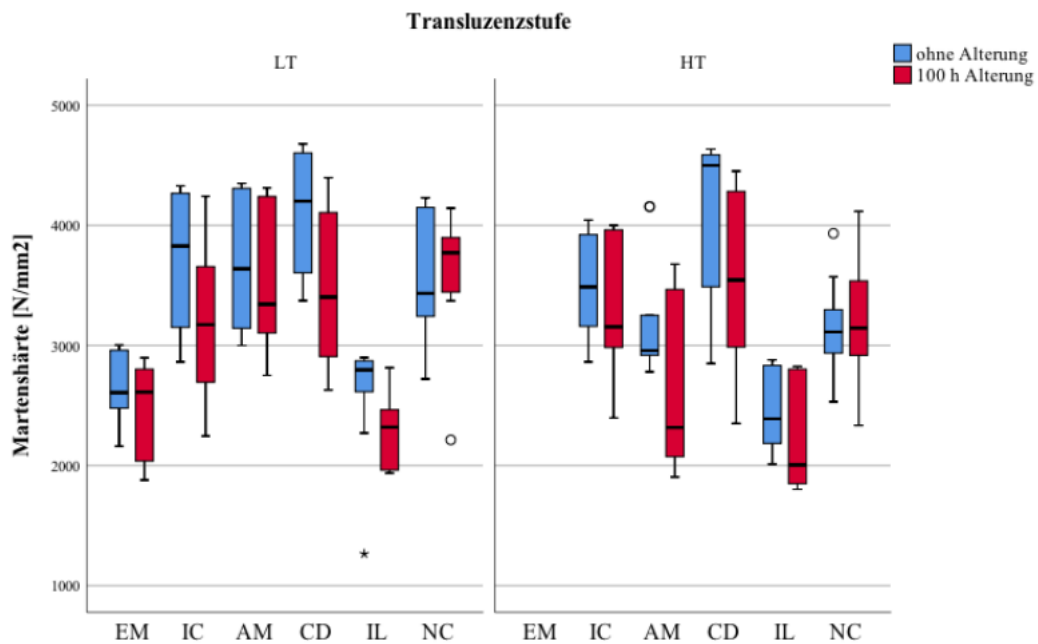
Nicht normalverteilte Gruppen sind mit \* markiert. Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

#### 7.1.1.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

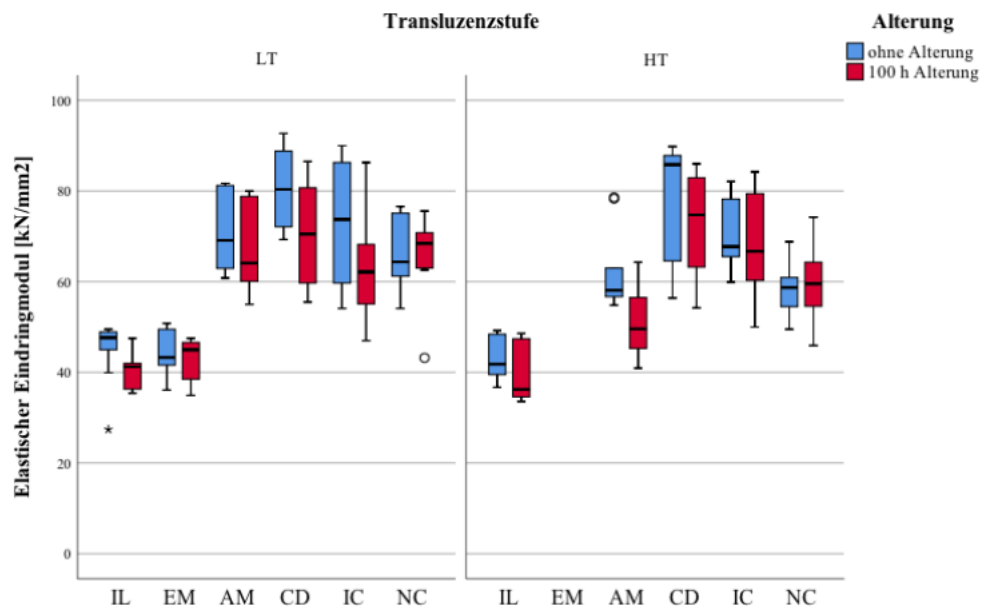
CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für  $n!ce$  vor der hydrothermalen Alterung höhere Werte für die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul als CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe HT ( $p \leq 0,034$ ; Tabelle 3, Tabelle 4). Für Amber Mill konnten sowohl vor als auch nach hydrothormaler Alterung höhere Werte für Blöcke der Transluzenzstufe LT ermittelt werden ( $p \leq 0,028$ ; Tabelle 3, Tabelle 4).

### 7.1.1.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten Initial LRF Block LT ( $p \leq 0,028$ ) Amber Mill HT (Nur EIT:  $p = 0,010$ ) und Celtra Duo LT ( $p \leq 0,049$ ) geringere Werte für die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul als bei initialer Prüfung (Tabelle 3, Tabelle 4).



**Abbildung 21:** Martenshärte und elastischer Eindringmodul in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.



**Abbildung 22:** Elastischer Eindringmodul in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Angegeben sind Minimum, Median und Maximum sowie Ausreißer (o) und Extremwerte (\*).

### 7.1.2 Biaxiale Biegefestigkeit

In einer globalen Analyse zeigten die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,818$ ;  $p<0,001$ ) und das Alterungslevel ( $\eta_p^2=0,123$ ;  $p<0,001$ ) den größten Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit. Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Alterung ( $\eta_p^2=0,098$ ;  $p<0,001$ ) sowie zwischen der Transluzenzstufe und der Alterung ( $\eta_p^2=0,025$ ;  $p=0,037$ ) waren ebenfalls signifikant, zeigten jedoch einen geringeren Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit.

Die gemessenen Gruppen der biaxialen Biegefestigkeit wichen nicht von der Normalverteilung ab und wurden daher parametrisch ausgewertet.

### 7.1.2.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigte IPS e.max CAD vor der hydrothermalen Alterung die signifikant höchsten biaxialen Biegefestigkeitswerte ( $432 \pm 48,7$  MPa;  $p \leq 0,001$ ), während Amber Mill ( $336 \pm 70,9$  MPa;  $p \leq 0,001$ ) die zweithöchsten Werte zeigte. Initial LRF Block ( $162 \pm 10,5$  MPa) lag im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $190 \pm 23,3$  MPa;  $p = 0,767$ ) und n!ce ( $222 \pm 28,4$  MPa;  $p = 0,051$ ). Weiterhin lag Initial LRF Block ( $162 \pm 10,5$  MPa) im gleichen Wertebereich wie IPS Empress CAD ( $125 \pm 13,2$  MPa;  $p = 0,468$ ).

Innerhalb der HT-Blöcke zeigte IPS e.max CAD ( $418 \pm 57,6$  MPa;  $p \leq 0,001$ ) ebenfalls die höchsten Biegefestigkeitswerte gegenüber allen anderen Keramiken. Für Amber Mill ( $308 \pm 57,2$  MPa;  $p \leq 0,001$ ) konnten die zweithöchsten Werte ermittelt werden. Weitergehend gehörte n!ce ( $206 \pm 27,7$  MPa) zum gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $177 \pm 29,1$  MPa;  $p = 0,642$ ). Celtra Duo ( $177 \pm 29,1$  MPa) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $147 \pm 13,2$  MPa;  $p = 0,612$ ).

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten LT-Blöcke der Silikatkeramiken IPS e.max CAD ( $413 \pm 102$  MPa) und Amber Mill ( $367 \pm 70,8$  MPa;  $p = 0,697$ ) die höchsten Werte der biaxialen Biegefestigkeit ( $p \leq 0,001$ ). n!ce ( $222 \pm 55,6$  MPa) lag im gleichen Wertebereich wie IPS Empress CAD ( $221 \pm 21,0$  MPa;  $p < 0,999$ ), Celtra Duo ( $209 \pm 24,6$  MPa;  $p = 0,998$ ) und Initial LRF Block ( $192 \pm 17,2$  MPa;  $p = 0,923$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT lag IPS e.max CAD ( $407 \pm 80,9$  MPa) mit Amber Mill ( $372 \pm 106$  MPa;  $p = 0,862$ ) und Celtra Duo ( $313 \pm 77,8$  MPa;  $p = 0,080$ ) im höchsten Wertebereich ( $p \leq 0,025$ ). Celtra Duo ( $313 \pm 77,8$  MPa) gehörte weiterhin dem gleichen Wertebereich wie n!ce ( $233 \pm 23,9$  MPa;  $p = 0,180$ ) an. n!ce ( $233 \pm 23,9$  MPa) zählte außerdem gemeinsam mit Initial LRF Block ( $203 \pm 17,3$  MPa;  $p = 0,922$ ) zur Gruppe mit den geringsten Werten der biaxialen Biegefestigkeit ( $p \leq 0,025$ ).



**Tabelle 5:** Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	162±10,5 <sup>ab,y,Z</sup>	154;171	145	160	177
	HT	147±13,2 <sup>A,z,Z</sup>	137;157	134	160	175
EM	LT	125±13,2 <sup>a,z,Z</sup>	115;136	129	153	165
AM	LT	336±70,9 <sup>c,z,Z</sup>	285;388	114	121	156
	HT	308±57,2 <sup>C,z,Z</sup>	266;350	230	352	434
CD	LT	190±23,3 <sup>b,z,Z</sup>	172;208	148	208	239
	HT	177±29,1 <sup>B,z,Z</sup>	155;199	142	196	224
IC	LT	432±48,7 <sup>d,z,Z</sup>	396;467	212	324	376
	HT	418±57,6 <sup>D,z,Z</sup>	375;460	361	433	522
NC	LT	222±28,4 <sup>b,z,Z</sup>	201;244	305	424	486
	HT	206±27,7 <sup>AB,z,Z</sup>	185;227	181	219	279
Hydrothermale Alterung (100 h)						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	192±17,2 <sup>a,z,Y</sup>	179;205	148	197	208
	HT	203±17,3 <sup>A,z,Y</sup>	189;216	183	196	238
EM	LT	221±21,0 <sup>a,z,Y</sup>	203;237	176	219	242
AM	LT	367±70,8 <sup>b,z,Z</sup>	316;419	251	365	447
	HT	372±106 <sup>C,z,Z</sup>	295;449	200	369	555
CD	LT	209±24,6 <sup>a,z,Z</sup>	190;228	163	216	238
	HT	313±77,8 <sup>AB,y,Y</sup>	257;370	230	293	487
IC	LT	413±102 <sup>b,z,Z</sup>	338;487	266	433	595
	HT	407±80,9 <sup>C,z,Z</sup>	348;466	242	429	527
NC	LT	222±55,6 <sup>a,z,Z</sup>	182;263	149	224	316
	HT	233±23,9 <sup>BC,z,Y</sup>	215;251	207	231	283

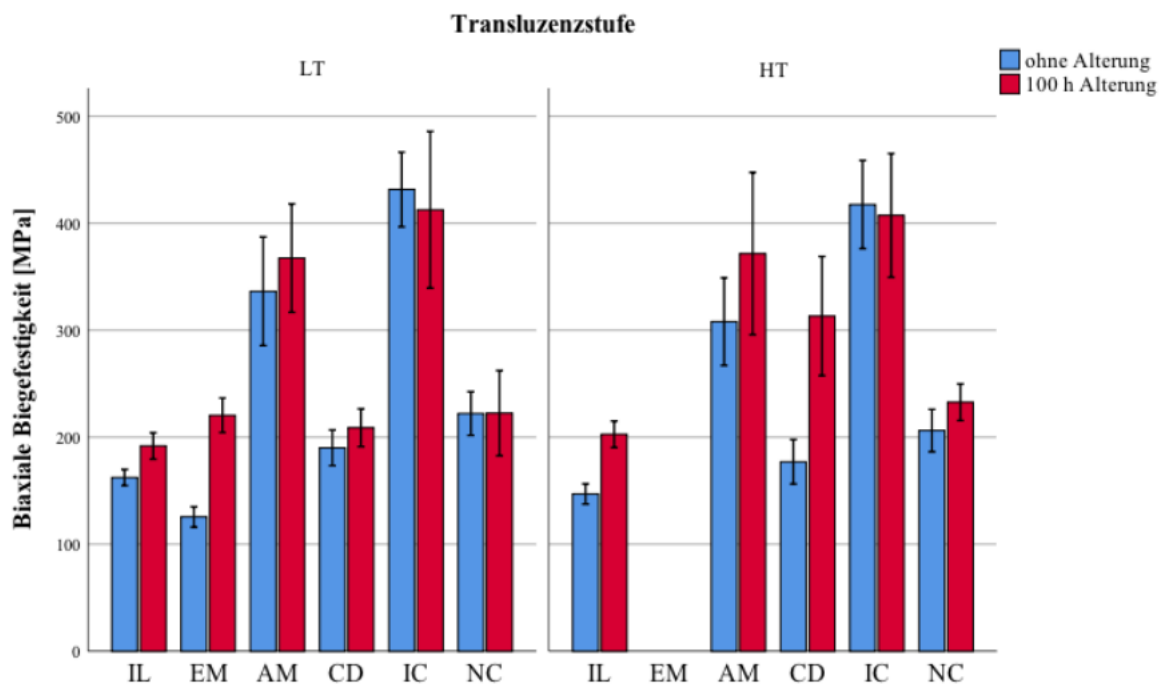
Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

### 7.1.2.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Initial LRF Block vor der hydrothermalen Alterung höhere Biegefestigkeitswerte als Blöcke der Transluzenzstufe HT ( $p=0,010$ ). Ebenfalls Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Celtra Duo nach hydrothormaler Alterung höhere Festigkeitswerte ( $p=0,001$ ; Tabelle 5).

### 7.1.2.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung

Nach der hydrothermalen Alterung wurden für Initial LRF Block LT und HT ( $p \leq 0,001$ ), IPS Empress LT ( $p < 0,001$ ), n!ce HT ( $p = 0,034$ ) und Celtra Duo HT ( $p < 0,001$ ) höhere Biegefestigkeitswerte gemessen als bei initialer Messung (Tabelle 5, Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Biaxiale Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 23 zeigt die Mittelwerte der biaxialen Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

## 7.1.3 Weibull Modul

### 7.1.3.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der LT-Blöcke gehörte Initial LRF Block (17,7) vor der hydrothermalen Alterung gemeinsam mit IPS Empress CAD (13,1) und IPS e.max CAD (10,1) zur Gruppe mit den höchsten Zuverlässigkeitswerten. IPS Empress CAD (13,1) und IPS e.max CAD (10,1) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie n!ce (9,11) und Celtra Duo (8,77). n!ce (9,11) und Celtra Duo (8,77) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie Amber Mill (5,11).

Hinsichtlich der Transluzenzstufe HT gehörten Initial LRF Block (13,0), IPS e.max CAD (7,79), n!ce (7,55) und Celtra Duo (7,54) zur Gruppe mit den höchsten Zuverlässigkeitswerten. Außerdem lagen IPS e.max CAD (7,79), n!ce (7,55) und Celtra Duo (7,54) im gleichen Wertebereich wie Amber Mill (5,71).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigten Blöcke der Keramiken Initial LRF Block (12,4), IPS Empress CAD (11,6) und Celtra Duo (9,29) nach der hydrothermalen Alterung die höchsten Zuverlässigkeitswerte. Weiterhin lagen Amber Mill (5,60), n!ce (4,56) und IPS e.max CAD (4,42) im gleichen Wertebereich.

HT-Blöcke der Keramiken Initial LRF Block (14,7) und n!ce (12,3) zeigten nach der hydrothermalen Alterung die höchsten Zuverlässigkeitswerte, während Celtra Duo (5,37), IPS e.max CAD (5,16) und Amber Mill (3,70) die signifikant geringsten Werte zeigten (Tabelle 6).

#### **7.1.3.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke**

CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten nach der hydrothermalen Alterung für n!ce (LT: 4,56; HT: 12,3) höhere Werte des Weibull Moduls als Blöcke der Transluzenzstufe LT.

#### **7.1.3.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung**

Nach der hydrothermalen Alterung konnten für IPS e.max CAD LT (Initial: 10,1; gealtert: 4,42) und n!ce LT (Initial: 9,11; gealtert: 4,56) signifikant verringerte Zuverlässigkeitswerte beobachtet werden.

**Tabelle 6:** Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m)

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Initial	Hydrothermale Alterung (100 h)
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	17,7 <sup>de,z,Z</sup> [9,21;33,9]	12,4 <sup>b,z,Z</sup> [6,50;23,8]
	HT	13,0 <sup>B,z,Z</sup> [6,75;24,9]	14,7 <sup>B,z,Z</sup> [7,66;28,1]
EM	LT	13,1 <sup>cdc,z,Z</sup> [6,80;25,1]	11,6 <sup>b,z,Z</sup> [5,83;23,0]
AM	LT	5,11 <sup>abc,z,Z</sup> [2,65;9,80]	5,60 <sup>a,z,Z</sup> [2,92;10,7]
	HT	5,71 <sup>AB,z,Z</sup> [2,97;11,0]	3,70 <sup>A,z,Z</sup> [1,92;7,07]
CD	LT	8,77 <sup>abd,z,Z</sup> [4,58;16,8]	9,29 <sup>b,z,Z</sup> [4,83;17,8]
	HT	6,54 <sup>AB,z,Z</sup> [3,41;12,5]	5,37 <sup>A,z,Z</sup> [2,80;10,3]
IC	LT	10,1 <sup>bcd,z,Y</sup> [5,28;19,5]	4,42 <sup>a,z,Z</sup> [2,29;8,48]
	HT	7,79 <sup>AB,z,Z</sup> [4,05;15,0]	5,16 <sup>A,z,Z</sup> [2,68;9,89]
NC	LT	9,11 <sup>abcd,z,Y</sup> [4,74;17,5]	4,56 <sup>a,z,Z</sup> [2,36;8,73]
	HT	7,55 <sup>AB,z,Z</sup> [3,93;14,5]	12,3 <sup>B,y,Z</sup> [6,39;23,5]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramik in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramik in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

#### 7.1.4 Charakteristische Festigkeit

##### 7.1.4.1 Einfluss der Silikatkeramik

Hinsichtlich der Festigkeitswerte lagen Blöcke beider Transluzenzstufen sowohl vor als auch nach der hydrothermalen Alterung für jede Silikatkeramik in einem eigenen Wertebereich. Die Festigkeitswerte innerhalb der Transluzenzstufe LT vor der hydrothermalen Alterung stellten sich wie folgt in absteigender Reihenfolge dar: IPS e.max CAD (452 MPa), Amber Mill (365 MPa), n!ce (234 MPa), Celtra Duo (200 MPa), Initial LRF Block (167 MPa) und IPS Empress CAD (130 MPa). Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte IPS e.max CAD (442 MPa) gefolgt von Amber Mill (322 MPa), n!ce (220 MPa), Celtra Duo (189 MPa) und Initial LRF Block (152 MPa) die höchsten Werte der charakteristischen Festigkeit.

Innerhalb der LT-Blöcke, die nach hydrothormaler Alterung geprüft wurden, zeigte IPS e.max CAD (451 MPa) gefolgt von Amber Mill (396 MPa), n!ce (243 MPa), IPS Empress CAD (230 MPa), Celtra Duo (219 MPa) und Initial LRF Block (199 MPa) die höchsten Werte. Unter Blöcken der Transluzenzstufe HT, die nach hydrothormaler Alterung geprüft wurden, zeigte ebenfalls IPS e.max CAD (442 MPa) vor Amber Mill (412 MPa), Celtra Duo (337 MPa), n!ce (242 MPa) und Initial LRF Block (209 MPa) die signifikant höchsten Festigkeitswerte.

#### 7.1.4.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Initial LRF Block vor der hydrothermalen Alterung (LT: 167 MPa; HT: 152 MPa) signifikant höhere Festigkeitswerte als die Transluzenzstufe HT. Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für Celtra Duo (LT: 219 MPa; HT: 337 MPa) nach der hydrothermalen Alterung höhere Festigkeitswerte als Blöcke der Transluzenzstufe LT (Tabelle 7).

#### 7.1.4.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung

Nach der hydrothermalen Alterung wurden für Initial LRF Block LT (LT: Initial: 167 MPa; gealtert: 199 MPa; HT: Initial: 152 MPa; gealtert: 209 MPa), IPS Empress CAD LT (Initial: 130 MPa; gealtert: 230 MPa), Amber Mill HT (Initial: 332 MPa; gealtert: 412 MPa), n!ce HT (Initial: 220 MPa; gealtert: 242 MPa), Celtra Duo LT (LT: Initial: 200 MPa; gealtert: 219 MPa; HT: Initial: 189 MPa; gealtert: 337 MPa) signifikant höhere Festigkeitswerte gemessen als bei initialer Prüfung (Tabelle 7).

**Tabelle 7:** Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeits [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Initial	Hydrothermale Alterung (100 h)
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	167 <sup>b,y,z</sup> [159;174]	199 <sup>a,z,y</sup> [187;211]
	HT	152 <sup>A,z,z</sup> [143;161]	209 <sup>A,z,y</sup> [199;220]
EM	LT	130 <sup>a,z</sup> [122;137]	230 <sup>bc,y</sup> [215;245]
AM	LT	365 <sup>c,z,z</sup> [318;416]	396 <sup>d,z,z</sup> [350;447]
	HT	332 <sup>D,z,z</sup> [294;374]	412 <sup>D,z,y</sup> [342;494]
CD	LT	200 <sup>c,z,z</sup> [184;217]	219 <sup>b,z,y</sup> [203;236]
	HT	189 <sup>B,z,z</sup> [169;210]	337 <sup>C,y,y</sup> [296;382]
IC	LT	452 <sup>f,z,z</sup> [423;483]	451 <sup>c,z,z</sup> [386;525]
	HT	442 <sup>E,z,z</sup> [404;483]	442 <sup>D,z,z</sup> [386;503]
NC	LT	234 <sup>d,z,z</sup> [216;252]	243 <sup>c,z,z</sup> [208;282]
	HT	220 <sup>C,z,z</sup> [201;241]	242 <sup>B,z,y</sup> [227;256]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

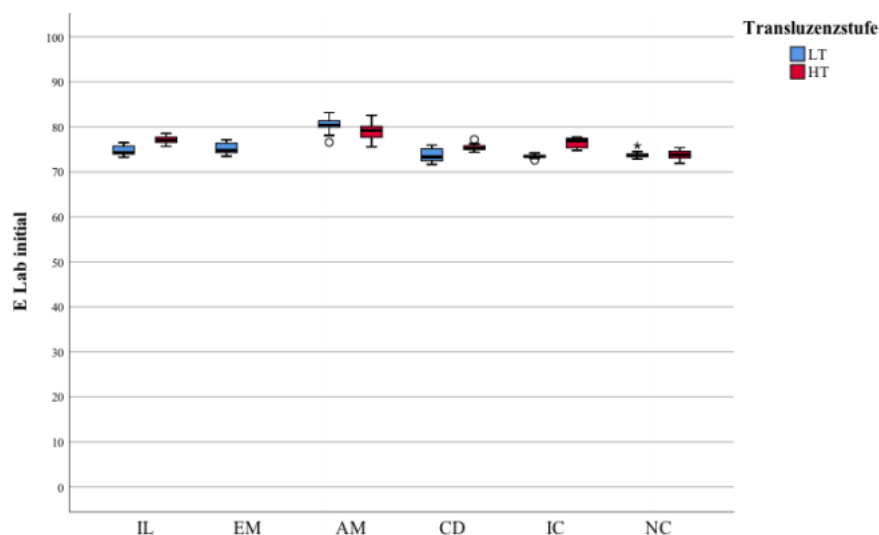
### 7.1.5 Initialer Farbwert

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,777$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt von der Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,365$ ;  $p<0,001$ ) und der Transluzenzstufe der Blöcke ( $\eta_p^2=0,206$ ;  $p<0,001$ ) den initialen Farbwert am stärksten.

Die Auswertung der initialen Farbwerte erfolgte nichtparametrisch, da eine Abweichung von der Normalverteilung beobachtet werden konnte. (27,3% der gemessenen Gruppen waren nicht normalverteilt; Tabelle 8).

#### 7.1.5.1 Einfluss der Silikatkeramik

Hinsichtlich der initialen Farbwerte lagen Blöcke der Transluzenzstufe LT wie auch Blöcke der Transluzenzstufe HT für jede Silikatkeramik in einem eigenen Wertebereich. Amber Mill (81,1;  $p\leq 0,001$ ) zeigte innerhalb der Transluzenzstufe LT gefolgt von IPS Empress CAD (76,7;  $p\leq 0,001$ ), Initial LRF Block (76,0;  $p\leq 0,002$ ), Celtra Duo (75,2;  $p\leq 0,002$ ), n!ce (74,0;  $p\leq 0,002$ ) und IPS e.max CAD (73,6;  $p\leq 0,010$ ) die höchsten Farbwerte. Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte Amber Mill (80,5;  $p\leq 0,001$ ) gefolgt von Initial LRF Block (78,0;  $p\leq 0,001$ ), IPS e.max CAD (76,9;  $p\leq 0,004$ ), Celtra Duo (76,1;  $p\leq 0,004$ ) und n!ce (74,7;  $p\leq 0,001$ ) die höchsten Farbwerte (Abbildung 24).



**Abbildung 24:** Initialer Farbwert in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 24 zeigt den initialen Farbwert in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Angegeben sind Minimum, Median und Maximum sowie Ausreißer (o) und Extremwerte (\*).

### 7.1.5.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für Initial LRF Block (LT: 76,0; HT: 78,0;  $p < 0,001$ ), IPS e.max CAD (LT: 73,6; HT: 76,9;  $p < 0,001$ ), Celtra Duo (LT: 75,2; HT: 76,1;  $p < 0,001$ ) und n!ce (LT: 74,0; HT: 74,7;  $p = 0,005$ ) höhere initiale Farbwerte als Blöcke der Transluzenzstufe LT (Abbildung 24).

**Tabelle 8:** Deskriptive Statistiken – E Lab initial

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

		E Lab initial				
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	76,0±0,334	75,7;76,4	75,7	76,0 <sup>*d,z</sup>	76,5
	HT	78,0±0,325	77,7;78,4	77,6	78,0 <sup>D,y</sup>	78,5
EM	LT	76,6±0,306	76,3;77,0	76,1	76,7 <sup>*e</sup>	77,1
AM	LT	81,1±0,927	80,4;81,9	79,9	81,1 <sup>f,z</sup>	82,5
	HT	80,5±1,30	79,5;81,5	78,3	80,5 <sup>E,z</sup>	82,6
CD	LT	75,3±0,400	74,9;75,7	74,5	75,2 <sup>c,z</sup>	75,9
	HT	76,0±0,443	75,7;76,5	75,7	76,1 <sup>B,y</sup>	77,2
IC	LT	73,5±0,472	73,1;74,0	72,6	73,6 <sup>a,z</sup>	74,1
	HT	76,9±0,609	76,4;77,5	76,0	76,9 <sup>*C,y</sup>	77,8
NC	LT	74,1±0,603	73,7;74,7	73,7	74,0 <sup>b,z</sup>	75,8
	HT	74,8±0,361	74,4;75,1	74,2	74,7 <sup>A,y</sup>	75,4

Nicht normalverteilte Gruppen sind mit \* markiert. Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC) und Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx).

### 7.1.6 Transluzenz und Farbwerte (Lab)

#### 7.1.7 Transluzenz

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2 = 0,811$ ;  $p < 0,001$ ) gefolgt von der Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2 = 0,577$ ;  $p < 0,001$ ), der Transluzenzstufe der Blöcke ( $\eta_p^2 = 0,563$ ;  $p < 0,001$ ) und dem Alterungslevel ( $\eta_p^2 = 0,360$ ;  $p < 0,001$ ) die Transluzenzwerte am stärksten. Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Alterung ( $\eta_p^2 = 0,064$ ;  $p = 0,023$ ) waren ebenfalls signifikant, beeinflusste die Transluzenzwerte jedoch am geringsten.

Die gemessenen Gruppen zeigten keine Abweichung von der Normalverteilung und wurden somit parametrisch ausgewertet.

#### 7.1.7.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb initial gemessener LT-Blöcke zeigte Amber Mill ( $49,2 \pm 1,81\%$ ;  $p \leq 0,001$ ) die signifikant höchsten Transluzenzwerte. IPS Empress CAD ( $46,9 \pm 0,544\%$ ) und Initial LRF Block ( $46,5 \pm 0,403\%$ ;  $p = 0,161$ ) lagen im gleichen Wertebereich, ebenso Celtra Duo ( $43,4 \pm 0,860\%$ ) und n!ce ( $42,7 \pm 1,05\%$ ;  $p = 0,087$ ). IPS e.max CAD ( $40,9 \pm 0,822\%$ ;  $p \leq 0,001$ ) zeigte die signifikant geringsten Transluzenzwerte.

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte Initial LRF Block ( $50,9 \pm 0,598\%$ ;  $p \leq 0,014$ ) die höchste Transluzenz. Amber Mill lag ( $48,5 \pm 2,53\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $48,4 \pm 1,03\%$ ;  $p = 0,925$ ). Celtra Duo ( $44,9 \pm 0,845\%$ ;  $p \leq 0,001$ ) bildete die Gruppe mit den dritthöchsten Werten ab, während n!ce ( $43,7 \pm 0,513\%$ ;  $p \leq 0,001$ ) hier die geringsten Werte zeigte.

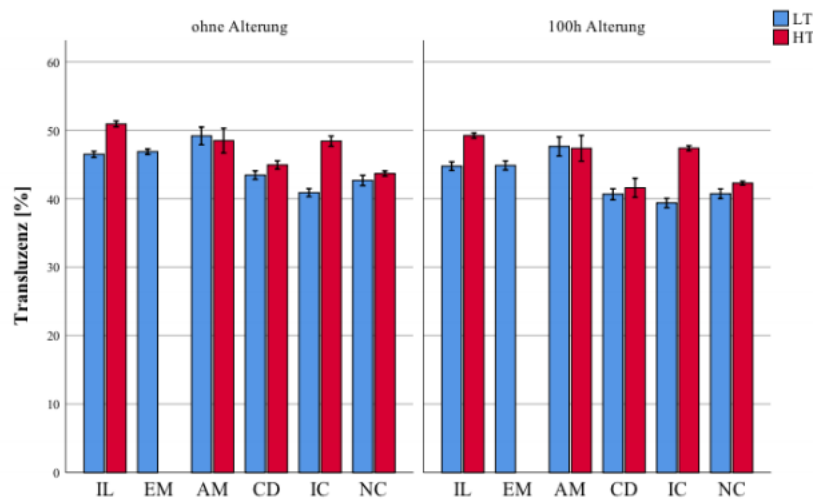
Innerhalb der LT-Blöcke zeigte Amber Mill ( $47,6 \pm 1,95\%$ ;  $p \leq 0,001$ ) nach hydrothormaler Alterung die signifikant höchsten Transluzenzwerte. IPS Empress CAD ( $44,9 \pm 0,867\%$ ) und Initial LRF Block ( $44,8 \pm 0,887\%$ ;  $p = 0,796$ ) lagen im zweithöchsten Wertebereich ( $p \leq 0,001$ ). Außerdem lagen n!ce ( $40,7 \pm 0,982\%$ ) und Celtra Duo ( $40,6 \pm 1,12\%$ ) im gleichen Wertebereich ( $p = 0,858$ ). IPS e.max CAD ( $39,4 \pm 0,949\%$ ;  $p \leq 0,013$ ) zeigte hier die signifikant geringste Transluzenz.

Hinsichtlich der Transluzenzstufe HT zeigten die Blöcke der Keramiken Initial LRF Block ( $49,2 \pm 0,539\%$ ) und Amber Mill ( $47,4 \pm 2,62\%$ ;  $p = 0,053$ ) nach hydrothormaler Alterung die höchsten Transluzenzwerte ( $p \leq 0,001$ ), während Amber Mill ( $47,4 \pm 2,62\%$ ) außerdem im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $47,4 \pm 0,513\%$ ;  $p = 0,994$ ) lag. n!ce ( $42,3 \pm 0,396\%$ ) und Celtra Duo ( $41,6 \pm 1,95\%$ ;  $p = 0,311$ ) zeigten die niedrigsten Werte ( $p \leq 0,001$ ).

#### 7.1.7.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für alle untersuchten Silikatkeramiken außer Amber Mill (Initial:  $p = 0,498$ ; gealtert:  $p = 0,803$ ) und Celtra Duo (Gealtert:  $p = 0,198$ ) sowohl vor als auch nach der hydrothermalen Alterung höhere Transluzenzwerte als LT-Blöcke ( $p \leq 0,014$ ; Tabelle 9, Abbildung 25).



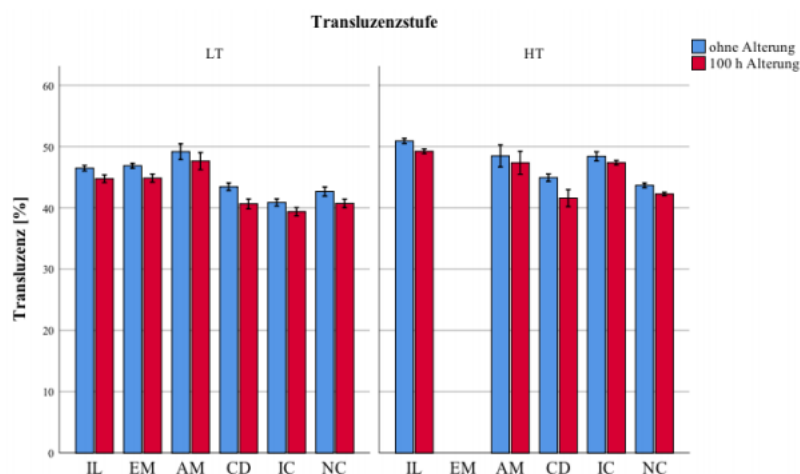


**Abbildung 25:** Transluzenz in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 25 zeigt die Transluzenz in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

### 7.1.7.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten alle untersuchten Silikatkeramiken außer Amber Mill LT und HT ( $p \leq 0,343$ ) signifikant niedrigere Transluzenzwerte als bei initialer Prüfung ( $p \leq 0,014$ ; Tabelle 9, Abbildung 26).



**Abbildung 26:** Transluzenz in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 26 zeigt die Transluzenz in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

**Tabelle 9:** Deskriptive Statistiken – Transluzenz [%]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	46,5 <sup>c,z,Y</sup> ±0,403	45,9;47,0	45,8	46,4	47,4
	HT	50,9 <sup>D,y,Y</sup> ±0,598	50,4;51,5	50,2	50,8	51,8
EM	LT	46,9 <sup>c,Y</sup> ±0,544	46,4;47,4	46,0	47,0	47,7
AM	LT	49,2 <sup>d,z,Z</sup> ±1,81	47,8;50,6	46,9	48,8	52,2
	HT	48,5 <sup>C,z,Z</sup> ±2,53	46,6;50,4	44,5	48,4	52,5
CD	LT	43,4 <sup>b,z,Y</sup> ±0,860	42,7;44,2	41,9	43,4	44,7
	HT	44,9 <sup>B,y,Y</sup> ±0,845	44,2;45,6	44,1	44,7	47,1
IC	LT	40,9 <sup>a,z,Y</sup> ±0,822	40,2;41,6	39,3	41,0	41,9
	HT	48,4 <sup>C,y,Y</sup> ±1,03	47,6;49,2	47,0	48,4	49,8
NC	LT	42,7 <sup>b,z,Y</sup> ±1,05	41,8;43,5	41,9	42,4	45,4
	HT	43,7 <sup>A,y,Y</sup> ±0,513	43,2;43,9	42,8	43,6	44,6
Hydrothermale Alterung (100 h)						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	44,8 <sup>c,z,Z</sup> ±0,887	44,0;45,5	43,3	44,7	46,2
	HT	49,2 <sup>C,y,Z</sup> ±0,539	48,7;49,7	48,6	49,2	50,2
EM	LT	44,9 <sup>c,Z</sup> ±0,867	44,1;45,6	43,6	44,5	46,2
AM	LT	47,6 <sup>d,z,Z</sup> ±1,95	46,1;49,1	44,8	47,4	51,1
	HT	47,4 <sup>BC,z,Z</sup> ±2,62	45,4;49,3	43,0	46,9	51,9
CD	LT	40,6 <sup>b,z,Z</sup> ±1,12	39,7;41,5	38,5	41,1	41,9
	HT	41,6 <sup>A,z,Z</sup> ±1,95	40,1;43,0	38,2	41,5	44,8
IC	LT	39,4 <sup>a,z,Z</sup> ±0,949	38,6;40,1	37,9	39,6	40,7
	HT	47,4 <sup>B,y,Z</sup> ±0,513	46,9;47,8	46,4	47,4	48,0
NC	LT	40,7 <sup>b,z,Z</sup> ±0,982	39,9;41,5	39,8	40,5	43,2
	HT	42,3 <sup>A,y,Z</sup> ±0,396	41,9;42,7	41,4	42,2	42,7

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramik in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramik in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

### 7.1.8 Korrelationen zwischen Transluzenz- und Farbwerten

Mithilfe einer Korrelationsanalyse nach Pearson konnten Korrelationen zwischen dem L-Wert und der Transluzenz, zwischen dem L-Wert und der Transluzenzänderung, sowie zwischen der Transluzenz und der Transluzenzänderung ermittelt werden. Eine positive Korrelation zwischen L-Wert und Transluzenz konnte ( $r=0,990$ ;  $p<0,001$ ) beobachtet werden. Außerdem wurde nach der hydrothermalen Alterung eine negative Korrelation jeweils zwischen dem L-Wert ( $r=-0,440$ ) bzw. der Transluzenz ( $r=-0,443$ ) und der Transluzenzänderung ( $p\leq 0,001$ ) ermittelt.

### 7.1.9 L-Wert

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,823$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt von der Interaktionen zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,556$ ;  $p<0,001$ ), der Transluzenzstufe der Blöcke ( $\eta_p^2=0,524$ ;  $p<0,001$ ) und dem Alterungslevel ( $\eta_p^2=0,314$ ;  $p<0,001$ ) den L-Wert am stärksten. Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Alterung ( $\eta_p^2=0,074$ ;  $p=0,009$ ) waren ebenfalls signifikant, zeigte jedoch den geringsten Einfluss auf den L-Wert.

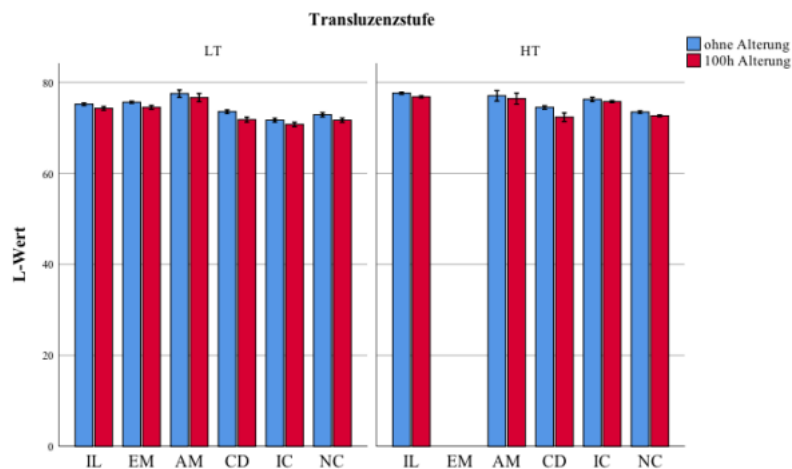
Die gemessenen Gruppen zeigten keine Abweichung von der Normalverteilung und wurden somit parametrisch ausgewertet.

#### 7.1.9.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb initial gemessener LT-Blöcke bildete jede Silikatkeramik einen eigenen Wertebereich ab. Amber Mill ( $77,5\pm1,12$ ;  $p\leq0,001$ ) zeigte gefolgt von IPS Empress CAD ( $75,6\pm0,331$ ;  $p\leq0,016$ ), Initial LRF Block ( $75,2\pm0,383$ ;  $p\leq0,016$ ), Celtra Duo ( $73,6\pm0,529$ ;  $p\leq0,001$ ), n!ce ( $72,9\pm0,659$ ;  $p\leq0,021$ ) und IPS e.max CAD ( $71,7\pm0,567$ ;  $p\leq0,001$ ) die höchsten L-Werte. Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte Initial LRF Block ( $77,6\pm0,345$ ) gemeinsam mit Amber Mill ( $77,0\pm1,58$ ;  $p=0,290$ ) die höchsten L-Werte ( $p\leq0,001$ ). Amber Mill ( $77,0\pm1,58$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $76,3\pm0,631$ ;  $p=0,176$ ). Celtra Duo ( $74,5\pm0,520$ ;  $p\leq0,001$ ) bildete die Gruppe mit den dritthöchsten Werten ab, während n!ce ( $73,5\pm0,353$ ;  $p\leq0,001$ ) hier die geringsten Werte zeigte.

Innerhalb der LT-Blöcke zeigte Amber Mill ( $76,6\pm1,25$ ;  $p\leq0,001$ ) nach hydrothormaler Alterung die signifikant höchsten L-Werte. IPS Empress CAD ( $74,5\pm0,546$ ) und Initial LRF Block ( $74,3\pm0,573$ ;  $p=0,401$ ) lagen im zweithöchsten Wertebereich ( $p\leq0,001$ ). Außerdem lagen Celtra Duo ( $71,8\pm0,763$ ) und n!ce ( $71,7\pm0,646$ ) im gleichen Wertebereich ( $p=0,690$ ). IPS e.max CAD ( $70,7\pm0,676$ ;  $p\leq0,005$ ) zeigte hier die signifikant geringsten L-Werte.

Hinsichtlich der Transluzenzstufe HT zeigten die Blöcke der Keramiken Initial LRF Block ( $76,8\pm0,320$ ) und Amber Mill ( $76,4\pm1,67$ ;  $p=0,502$ ) nach hydrothormaler Alterung die höchsten L-Werte ( $p\leq0,001$ ), während Amber Mill ( $76,4\pm1,67$ ) außerdem im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $75,8\pm0,318$ ;  $p=0,251$ ) lag. n!ce ( $72,6\pm0,260$ ) und Celtra Duo ( $72,3\pm1,31$ ;  $p=0,495$ ) lagen im geringsten Wertebereich ( $p\leq0,001$ ).



**Abbildung 27:** L-Wert in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 27 zeigt den L-Wert in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

#### 7.1.9.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

CAD/CAM-Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für alle untersuchten Silikatkeramiken außer Amber Mill (Initial:  $p=0,444$ ; gealtert:  $p=0,753$ ) und Celtra Duo (Gealtert:  $p=0,282$ ) sowohl vor als auch nach der hydrothermalen Alterung höhere L-Werte, als Blöcke der Transluzenzstufe LT ( $p \leq 0,022$ ; Tabelle 10; Abbildung 27).

#### 7.1.9.3 Einfluss der hydrothermalen Alterung

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten alle untersuchten Silikatkeramiken außer Amber Mill LT und HT ( $p \leq 0,417$ ) signifikant niedrigere L-Werte als bei initialer Prüfung ( $p \leq 0,048$ ; Tabelle 10).

**Tabelle 10:** Deskriptive Statistiken – L-Wert

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	75,2 <sup>d,z,Y</sup> ±0,383	74,8;75,4	74,8	75,1	75,7
	HT	77,6 <sup>D,y,Y</sup> ±0,345	77,3;78,0	77,2	77,6	78,1
EM	LT	75,6 <sup>e,Y</sup> ±0,331	75,3;75,9	75,1	75,7	76,1
AM	LT	77,5 <sup>f,z,Z</sup> ±1,12	76,6;78,4	76,1	77,4	79,4
	HT	77,0 <sup>CD,z,Z</sup> ±1,58	75,8;78,3	74,5	77,0	79,5
CD	LT	73,6 <sup>c,z,Y</sup> ±0,529	73,1;74,0	72,5	73,5	74,3
	HT	74,5 <sup>B,y,Y</sup> ±0,520	73,9;74,9	74,0	74,4	75,8
IC	LT	71,7 <sup>a,z,Y</sup> ±0,567	71,2;72,2	70,6	71,8	72,4
	HT	76,3 <sup>C,y,Y</sup> ±0,631	75,7;76,8	75,4	76,3	77,1
NC	LT	72,9 <sup>b,z,Y</sup> ±0,659	72,3;74,3	72,4	72,7	74,6
	HT	73,5 <sup>A,y,Y</sup> ±0,353	73,1;73,8	72,9	73,4	74,1
Hydrothermale Alterung (100 h)						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	74,3 <sup>c,z,Z</sup> ±0,573	73,7;74,8	73,4	74,2	75,3
	HT	76,8 <sup>C,y,Z</sup> ±0,320	76,5;77,0	76,4	76,7	77,4
EM	LT	74,5 <sup>c,z,Z</sup> ±0,546	73,9;75,0	73,7	74,2	75,4
AM	LT	76,6 <sup>d,z,Z</sup> ±1,25	75,6;77,6	74,8	76,5	78,8
	HT	76,4 <sup>BC,z,Z</sup> ±1,67	75,1;77,7	73,5	76,2	79,3
CD	LT	71,8 <sup>b,z,Z</sup> ±0,763	71,2;72,5	70,4	72,2	72,6
	HT	72,3 <sup>A,z,Z</sup> ±1,31	71,3;73,4	71,3	72,3	74,4
IC	LT	70,7 <sup>a,z,Z</sup> ±0,676	70,1;71,3	69,6	70,9	71,7
	HT	75,8 <sup>B,y,Z</sup> ±0,318	75,4;76,0	75,2	75,8	76,2
NC	LT	71,7 <sup>b,z,Z</sup> ±0,646	71,2;72,2	70,9	71,5	73,3
	HT	72,6 <sup>A,y,Z</sup> ±0,260	72,3;72,9	72,1	72,6	73,0

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC), Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) und Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit großen Buchstaben (ZYX) dargestellt.

### 7.1.10 Transluzenz- und Farbänderung

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik (Farbänderung:  $\eta_p^2=0,454$ ;  $p<0,001$ ; Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,428$ ;  $p<0,001$ ) die Farb- und Transluzenzänderung am stärksten. Für die Farbänderung  $\Delta E$  konnte weiterhin ein Einfluss der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,014$ ;  $p=0,040$ ) festgestellt werden. Interaktionen konnten für Farb- wie Transluzenzänderung zwischen der Keramik und der Alterung (Farbänderung:  $\eta_p^2=0,107$ ;  $p<0,001$ ; Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,138$ ;  $p<0,001$ ) zwischen der Keramik und der Transluzenzstufe (Farbänderung:  $\eta_p^2=0,051$ ;  $p=0,003$ ; Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,077$ ;  $p<0,001$ ) und zwischen der Keramik, der Alterung und der Transluzenzstufe (Farbänderung:  $\eta_p^2=0,036$ ;  $p=0,022$ ; Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,043$ ;  $p=0,009$ ) beobachtet werden.

Die gemessenen Gruppen wichen nicht von der Normalverteilung ab und wurden daher parametrisch ausgewertet.

#### 7.1.10.1 Einfluss der Silikatkeramik

Hinsichtlich der Transluzenzänderung bei LT-Blöcken lag Celtra Duo ( $2,80\pm0,902\%$ ) gemeinsam mit IPS Empress CAD ( $2,07\pm0,812\%$ ;  $p=0,284$ ) und n!ce ( $1,94\pm0,256\%$ ;  $p=0,109$ ) im höchsten Wertebereich ( $p\leq0,020$ ). IPS Empress CAD ( $2,07\pm0,812\%$ ) und n!ce ( $1,94\pm0,256\%$ ;  $p<0,999$ ) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $1,73\pm0,598\%$ ;  $p\leq0,999$ ), Amber Mill ( $1,54\pm0,623\%$ ;  $p\leq0,840$ ) und IPS e.max CAD ( $1,51\pm0,295\%$ ;  $p\leq0,800$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte Celtra Duo ( $3,34\pm1,62\%$ ;  $p\leq0,006$ ) die signifikant höchste Transluzenzänderung. Initial LRF Block ( $1,70\pm0,344\%$ ) lag hier in einem Wertebereich mit n!ce ( $1,41\pm0,508\%$ ;  $p=0,971$ ), Amber Mill ( $1,12\pm0,761\%$ ;  $p=0,728$ ) und IPS e.max CAD ( $1,03\pm0,700\%$ ;  $p=0,609$ ; Tabelle 11).

Innerhalb der LT- wie auch der HT-Blöcke zeigte Celtra Duo die höchsten Werte für die Farbänderung (LT:  $2,67\pm0,537$ ;  $p\leq0,006$ ; HT:  $2,70\pm1,13$ ;  $p\leq0,013$ ). Außerdem lag IPS Empress CAD ( $1,93\pm0,462$ ) innerhalb der Transluzenzstufe LT im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $1,86\pm0,181$ ;  $p<0,999$ ), Initial LRF Block ( $1,61\pm0,190$ ;  $p=0,600$ ), IPS e.max CAD ( $1,61\pm0,358$ ;  $p=0,623$ ) und Amber Mill ( $1,56\pm0,364$ ;  $p=0,420$ ). Innerhalb der Transluzenzstufe HT lag Initial LRF Block ( $1,72\pm0,186$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $1,56\pm0,272$ ;  $p=0,984$ ), n!ce ( $1,53\pm0,343$ ;  $p=0,970$ ) und Amber Mill ( $1,49\pm0,417$ ;  $p=0,951$ ).

### 7.1.10.2 Einfluss Transluzenzstufe

In Abhängigkeit von der gewählten Transluzenzstufe konnte beobachtet werden, dass die Transluzenzstufe LT bei n!ce zu höheren Werten der Transluzenz- und Farbänderung führte, als die Transluzenzstufe HT (Transluzenzänderung:  $1,94 \pm 0,256$ ;  $p=0,011$ ; Farbänderung:  $1,86 \pm 0,181$ ;  $p=0,016$ ).

**Tabelle 11:** Deskriptive Statistiken –Transluzenzänderung [%] und Farbänderung  $\Delta E$  nach hydrothermalen Alterung (100 h)

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Transluzenzänderung						
Ker	TS	MW $\pm$ SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	$1,73^{a,z} \pm 0,598$	1,30;2,16	0,429	1,65	2,51
	HT	$1,70^{A,z} \pm 0,344$	1,44;1,95	1,22	1,68	2,41
EM	LT	$2,07^{ab,z} \pm 0,812$	1,44;2,71	1,12	2,11	3,40
AM	LT	$1,54^{a,z} \pm 0,623$	1,08;1,99	0,495	1,39	2,54
	HT	$1,12^{A,z} \pm 0,761$	0,574;1,67	0,033	1,02	2,31
CD	LT	$2,80^{b,z} \pm 0,902$	2,15;3,46	1,55	2,92	4,66
	HT	$3,34^{B,z} \pm 1,62$	2,17;4,51	1,35	2,97	6,24
IC	LT	$1,51^{a,z} \pm 0,295$	1,29;1,73	1,16	1,47	2,08
	HT	$1,03^{A,z} \pm 0,700$	0,528;1,54	0,099	0,941	2,18
NC	LT	$1,94^{ab,y} \pm 0,256$	1,75;2,13	1,62	1,90	2,44
	HT	$1,41^{A,z} \pm 0,508$	1,03;1,78	0,562	1,40	1,98
Farbänderung $\Delta E$						
Ker	TS	MW $\pm$ SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	$1,61^{a,z} \pm 0,190$	1,46;1,75	1,36	1,52	1,91
	HT	$1,72^{A,z} \pm 0,186$	1,57;1,83	1,54	1,68	2,13
EM	LT	$1,93^{a,z} \pm 0,462$	1,56;2,29	1,42	1,72	2,82
AM	LT	$1,56^{a,z} \pm 0,364$	1,27;1,82	1,02	1,51	2,07
	HT	$1,49^{A,z} \pm 0,417$	1,19;1,79	0,96	1,41	2,22
CD	LT	$2,67^{b,z} \pm 0,537$	2,28;3,04	1,99	2,81	3,67
	HT	$2,70^{B,z} \pm 1,13$	1,88;3,49	1,58	2,44	4,77
IC	LT	$1,61^{a,z} \pm 0,358$	1,34;1,86	1,02	1,56	2,19
	HT	$1,56^{A,z} \pm 0,272$	1,35;1,74	1,13	1,54	1,96
NC	LT	$1,86^{a,y} \pm 0,181$	1,73;2,00	1,60	1,89	2,18
	HT	$1,53^{A,z} \pm 0,343$	1,27;1,78	0,88	1,51	2,02

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (abc), Unterschiede zwischen den Keramiken in der Transluzenzstufe HT (ABC) und Unterschiede zwischen den Transluzenzstufen mit kleinen Buchstaben (zyx) dargestellt.

## 7.2 Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken

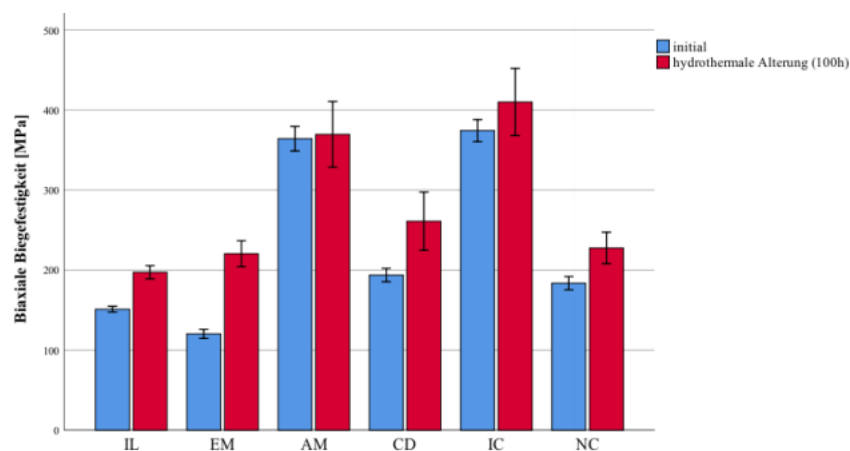
### 7.2.1 Biaxiale Biegefestigkeit

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,845$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt vom Alterungslevel ( $\eta_p^2=0,174$ ;  $p<0,001$ ), der Interaktion zwischen der gewählten Silikatkeramik und dem Befestigungskomposit ( $\eta_p^2=0,143$ ;  $p<0,001$ ) und der Farbe des Befestigungskomposits ( $\eta_p^2=0,097$ ;  $p<0,001$ ) die biaxiale Biegefestigkeit am stärksten. Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und dem Alterungslevel ( $\eta_p^2=0,007$ ;  $p<0,001$ ) war ebenfalls signifikant, beeinflusste die biaxiale Biegefestigkeit jedoch am geringsten.

Die analysierten Gruppen zeigten keine Abweichung von der Normalverteilung und wurden daher parametrisch ausgewertet.

#### 7.2.1.1 Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach hydrothormaler Alterung (100 h)

Die biaxiale Biegefestigkeit von Initial LRF Block (Initial:  $155\pm 14$  MPa; gealtert:  $197\pm 17,7$  MPa;  $p<0,001$ ), IPS Empress CAD (Initial:  $125\pm 13,3$  MPa; gealtert:  $221\pm 21,0$  MPa;  $p<0,001$ ) und Celtra Duo (Initial:  $184\pm 26,5$  MPa; gealtert:  $261\pm 77,6$  MPa;  $p<0,001$ ) war bei Prüfkörpern, die nach der hydrothermalen Alterung gemessen wurden, höher als bei initial gemessenen Prüfkörpern (Tabelle 12). Bei Amber Mill ( $p=0,059$ ), IPS e.max CAD ( $p=0,535$ ) und n!ce ( $p=0,245$ ) konnte kein Unterschied beobachtet werden (Tabelle 12, Abbildung 28).



**Abbildung 28:** Biaxiale Biegefestigkeit initial und nach hydrothormaler Alterung (100 h). Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.



Abbildung 28 zeigt die Mittelwerte der biaxialen Biegefestigkeit initial sowie nach hydrothermaler Alterung (100 h). Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

**Tabelle 12:** Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [MPa]  
mit Ker: Keramik, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial					
Ker	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	155±14,0 <sup>b</sup>	147;162	129	156	177
EM	125±13,3 <sup>b</sup>	115;136	114	121	156
AM	322±64,4 <sup>a</sup>	292;353	212	334	434
CD	184±26,5 <sup>b</sup>	170;197	128	190	224
IC	425±52,4 <sup>a</sup>	399;450	305	433	522
NC	214±28,5 <sup>a</sup>	200;229	148	215	279
Hydrothermale Alterung (100 h)					
Ker	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	197±17,7 <sup>a</sup>	188;206	148	197	238
EM	221±21,0 <sup>a</sup>	203;237	176	219	242
AM	370±87,8 <sup>a</sup>	327;412	200	365	555
CD	261±77,6 <sup>a</sup>	223;298	163	232	487
IC	410±89,8 <sup>a</sup>	367;453	242	433	595
NC	228±42,0 <sup>a</sup>	207;248	149	227	316

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung mit kleinen Buchstaben (ab) dargestellt.

### 7.2.1.2 Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+

Die biaxiale Biegefestigkeit von IPS Empress CAD (Initial: 125±13,3 MPa; Light+: 112±14,7 MPa;  $p=0,050$ ), IPS e.max CAD (Initial: 425±52,4 MPa; Light+: 356±32,5 MPa;  $p<0,001$ ) und n!ce (Initial: 214±28,5 MPa; Light+: 169±21,1 MPa;  $p<0,001$ ) lag bei initial geprüften Gruppen höher, als bei Gruppen, die mit Befestigungskomposit (Light+) versehen worden waren. Amber Mill (Initial: 322±64,4 MPa; Light+: 375±49,3 MPa;  $p=0,006$ ) wies für Prüfkörper mit Befestigungskomposit (Light+) höhere Biegefestigkeitswerte auf, als für initial gemessene Prüfkörper. Hinsichtlich der biaxialen Biegefestigkeit von Initial LRF Block ( $p=0,452$ ) und Celtra Duo ( $p=0,188$ ) konnten hingegen keine Unterschiede zwischen initial gemessenen und mit Befestigungskomposit (Light+) versehenen Gruppen beobachtet werden (Tabelle 13, Abbildung 29).

### **7.2.1.3 Initiale biaxiale Biegefestigkeit vs. biaxiale Biegefestigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+**

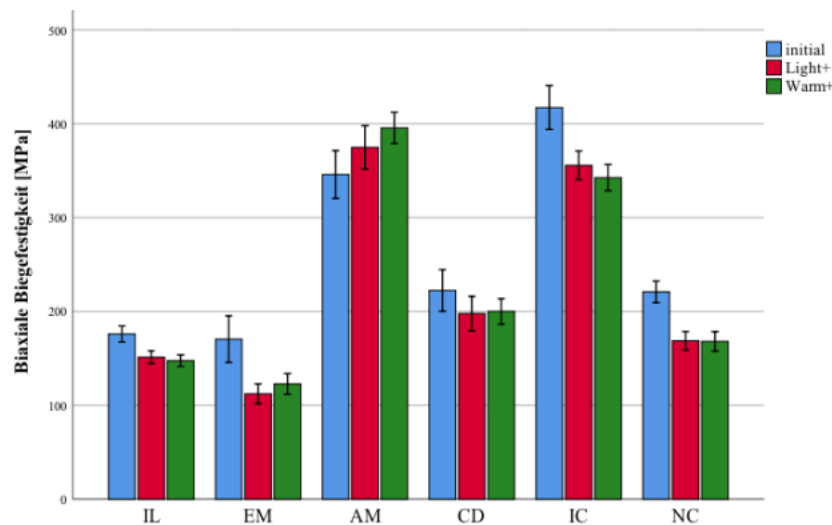
Die biaxiale Biegefestigkeit von IPS e.max CAD (Initial:  $425 \pm 52,4$  MPa; Warm+:  $343 \pm 29,9$  MPa;  $p < 0,001$ ) und Celtra Duo (Initial:  $184 \pm 26,5$  MPa; Warm+:  $200 \pm 29,1$  MPa;  $p < 0,001$ ) war bei initial geprüften Gruppen höher, als bei Gruppen, die mit Befestigungskomposit (Warm+) versehen worden waren. Amber Mill (Initial:  $322 \pm 64,4$  MPa; Warm+:  $396 \pm 35,6$  MPa;  $p < 0,001$ ) wies für Prüfkörper mit Befestigungskomposit (Warm+) höhere Biegefestigkeitswerte auf, als für initial gemessene Prüfkörper. Weiterhin konnten für Initial LRF Block ( $p = 0,109$ ), IPS Empress CAD ( $p = 0,688$ ) und n!ce ( $p = 0,070$ ) keine Unterschiede der biaxialen Biegefestigkeit zwischen initial gemessenen und mit Befestigungskomposit (Warm+) versehenen Gruppen beobachtet werden (Tabelle 13, Abbildung 29).

**Tabelle 13:** Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [MPa]

mit Ker: Keramik, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial					
Ker	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	155±14,0 <sup>a,A</sup>	147;162	129	156	177
EM	125±13,3 <sup>b,A</sup>	115;136	114	121	156
AM	322±64,4 <sup>a,B</sup>	292;353	212	334	434
CD	184±26,5 <sup>a,A</sup>	170;197	128	190	224
IC	425±52,4 <sup>b,A</sup>	399;450	305	433	522
NC	214±28,5 <sup>b,A</sup>	200;229	148	215	279
Befestigungskomposit Light+					
Ker	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	151±14,6 <sup>a</sup>	143;159	129	151	175
EM	112±14,7 <sup>a</sup>	101;124	90	113	133
AM	375±49,3 <sup>b</sup>	351;399	268	378	484
CD	198±39,3 <sup>a</sup>	178;217	135	185	278
IC	356±32,5 <sup>a</sup>	339;372	270	361	407
NC	169±21,1 <sup>a</sup>	158;180	132	172	209
Befestigungskomposit Warm+					
Ker	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	148±13,2 <sup>A</sup>	140;155	116	149	178
EM	123±15,5 <sup>A</sup>	111;135	93	123	148
AM	396±35,6 <sup>A</sup>	377;413	325	398	458
CD	200±29,1 <sup>B</sup>	185;215	164	197	273
IC	343±29,9 <sup>B</sup>	328;358	274	346	384
NC	168±22,3 <sup>A</sup>	157;178	128	167	211

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit Light+ mit kleinen Buchstaben (ab) und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit Warm+ mit großen Buchstaben (AB) dargestellt.



**Abbildung 29:** Biaxiale Biegefestigkeit initial und nach Aufbringen des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 29 zeigt die Mittelwerte der initialen biaxialen Biegefestigkeit sowie mit aufgebrachttem Befestigungskomposit in den Farben Light+ und Warm+. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

## 7.2.2 Weibull Modul

### 7.2.2.1 Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach hydrothormaler Alterung (100 h)

Für IPS e.max CAD LT (Initial: 10,1; gealtert: 4,42) und n!ce HT (Initial: 9,11; gealtert: 4,56) konnten signifikant geringere Weibull Modul Werte für die nach hydrothormaler Alterung gemessenen Prüfkörper im Vergleich zu den initial gemessenen Prüfkörpern ermittelt werden. Weiterhin konnten für die Keramiken Initial LRF Block LT und HT, IPS Empress CAD LT, Amber Mill LT und HT, Celtra Duo LT und HT, IPS e.max CAD HT und n!ce HT keine Unterschiede zwischen initial und nach hydrothormaler Alterung gemessenen Prüfkörpern beobachtet werden (Tabelle 14).

**Tabelle 14:** Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m)

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Initial	Hydrothermale Alterung (100 h)
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	17,7 <sup>a</sup> [9,21;33,9]	12,4 <sup>a</sup> [6,50;23,8]
	HT	13,0 <sup>A</sup> [6,75;24,9]	14,7 <sup>A</sup> [7,66;28,1]
EM	LT	13,1 <sup>a</sup> [6,80;25,1]	11,6 <sup>a</sup> [5,83;23,0]
AM	LT	5,11 <sup>a</sup> [2,65;9,80]	5,60 <sup>a</sup> [2,92;10,7]
	HT	5,71 <sup>A</sup> [2,97;11,0]	3,70 <sup>A</sup> [1,92;7,07]
CD	LT	8,77 <sup>a</sup> [4,58;16,8]	9,29 <sup>a</sup> [4,83;17,8]
	HT	6,54 <sup>A</sup> [3,41;12,5]	5,37 <sup>A</sup> [2,80;10,3]
IC	LT	10,1 <sup>b</sup> [5,28;19,5]	4,42 <sup>a</sup> [2,29;8,48]
	HT	7,79 <sup>A</sup> [4,05;15,0]	5,16 <sup>A</sup> [2,68;9,89]
NC	LT	9,11 <sup>b</sup> [4,74;17,5]	4,56 <sup>a</sup> [2,36;8,73]
	HT	7,55 <sup>A</sup> [3,93;14,5]	12,3 <sup>A</sup> [6,39;23,5]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung innerhalb der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (ab) und innerhalb der Transluzenzstufe HT mit großen Buchstaben (AB) dargestellt.

#### 7.2.2.2 Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+

Beim Vergleich der Werte des Weibull Moduls von initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die nach Aufbringen des Befestigungskomposits Light+ gemessen wurden, konnten keine Unterschiede beobachtet werden (Tabelle 15).

#### 7.2.2.3 Initialer Weibull Modul vs. Weibull Modul nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+

Für Amber Mill LT (Initial: 5,11; Warm+: 14,1), Amber Mill HT (Initial: 5,71; Warm+: 12,8) und IPS e.max CAD LT (Initial: 10,1; Warm+: 23,6) konnten höhere Werte des Weibull Moduls für Prüfkörper, die mit Befestigungskomposit Warm+ versehen worden waren, als für initial gemessene Prüfkörper, ermittelt werden. Weiterhin konnte kein Unterschied zwischen initial gemessenen und mit Befestigungskomposit Warm+ versehenen Prüfkörpern ermittelt werden (Tabelle 15).

**Tabelle 15:** Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m)

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

		Initial	Befestigungskomposit Light+	Befestigungskomposit Warm+
Ker	TS	MW 95%KI	MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	17,7 <sup>a,A</sup> [9,21;33,9]	11,8 <sup>a</sup> [6,15;22,7]	11,7 <sup>A</sup> [6,08;22,4]
	HT	13,0 <sup>z,Z</sup> [6,75;24,9]	17,7 <sup>z</sup> [9,23;34,0]	16,7 <sup>Z</sup> [8,70;32,0]
EM	LT	13,1 <sup>a,A</sup> [6,80;25,1]	8,46 <sup>a</sup> [4,40;16,3]	8,66 <sup>A</sup> [4,51;16,6]
AM	LT	5,11 <sup>a,A</sup> [2,65;9,80]	7,36 <sup>a</sup> [3,83;14,1]	14,1 <sup>B</sup> [7,32;27,0]
	HT	5,71 <sup>z,Z</sup> [2,97;11,0]	10,9 <sup>z</sup> [5,68;21,0]	12,8 <sup>Y</sup> [6,69;24,6]
CD	LT	8,77 <sup>a,A</sup> [4,58;16,8]	8,56 <sup>a</sup> [4,45;16,4]	6,83 <sup>A</sup> [3,55;13,1]
	HT	6,54 <sup>z,Z</sup> [3,41;12,5]	6,45 <sup>z</sup> [3,35;12,4]	12,4 <sup>Z</sup> [6,48;23,7]
IC	LT	10,1 <sup>a,A</sup> [5,28;19,5]	12,8 <sup>a</sup> [6,69;24,6]	23,6 <sup>B</sup> [12,2;45,3]
	HT	7,79 <sup>z,Z</sup> [4,05;15,0]	11,5 <sup>z</sup> [6,01;22,2]	14,4 <sup>Z</sup> [7,51;27,7]
NC	LT	9,11 <sup>a,A</sup> [4,74;17,5]	10,2 <sup>a</sup> [5,29;19,5]	11,5 <sup>A</sup> [5,98;22,0]
	HT	7,55 <sup>z,Z</sup> [3,93;14,5]	7,98 <sup>z</sup> [4,15;15,3]	8,38 <sup>Z</sup> [4,36;16,1]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe LT (Light+) mit kleinen Buchstaben (ab), Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe LT (Warm+) mit großen Buchstaben (AB), Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe HT (Light+) mit kleinen Buchstaben (zy) und Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe HT (Warm+) mit großen Buchstaben (ZY) dargestellt.

### 7.2.3 Charakteristische Festigkeit

#### 7.2.3.1 Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach hydrothermalen Alterung (100 h)

Die Keramiken Initial LRF Block LT und HT (LT: initial: 167 MPa; gealtert: 199 MPa; HT: initial: 152; gealtert: 209 MPa), IPS Empress CAD LT (Initial: 130 MPa; gealtert: 230 MPa), Amber Mill HT (Initial: 332 MPa; gealtert: 412 MPa), Celtra Duo LT und HT (LT: initial: 200 MPa; gealtert: 219 MPa; HT: initial: 189; gealtert: 337 MPa) sowie n!ce HT (Initial: 220 MPa; gealtert: 242 MPa) zeigten bei Messung nach hydrothermalen Alterung signifikant höhere charakteristische Festigkeitswerte, als bei der initialen Messung. Weiterhin konnten keine Unterschiede zwischen initialen Messwerten und Messwerten nach hydrothermalen Alterung beobachtet werden (Tabelle 16).

**Tabelle 16:** Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Initial	Hydrothermale Alterung (100 h)
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	167 <sup>a</sup> [159;174]	199 <sup>b</sup> [187;211]
	HT	152 <sup>A</sup> [143;161]	209 <sup>B</sup> [199;220]
EM	LT	130 <sup>a</sup> [122;137]	230 <sup>b</sup> [215;245]
AM	LT	365 <sup>a</sup> [318;416]	396 <sup>a</sup> [350;447]
	HT	332 <sup>A</sup> [294;374]	412 <sup>B</sup> [342;494]
CD	LT	200 <sup>a</sup> [184;217]	219 <sup>b</sup> [203;236]
	HT	189 <sup>A</sup> [169;210]	337 <sup>B</sup> [296;382]
IC	LT	452 <sup>a</sup> [423;483]	451 <sup>a</sup> [386;525]
	HT	442 <sup>A</sup> [404;483]	442 <sup>A</sup> [386;503]
NC	LT	234 <sup>a</sup> [216;252]	243 <sup>a</sup> [208;282]
	HT	220 <sup>A</sup> [201;241]	242 <sup>B</sup> [227;256]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die hydrothermale Alterung innerhalb der Transluzenzstufe LT mit kleinen Buchstaben (ab) und innerhalb der Transluzenzstufe HT mit großen Buchstaben (AB) dargestellt.

### 7.2.3.2 Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Light+

Initial gemessene Prüfkörper zeigten für IPS Empress CAD LT (Initial: 130 MPa; Light+: 118 MPa), Celtra Duo LT (Initial: 200 MPa; Light+: 184 MPa), IPS e.max CAD LT und HT (LT: initial: 452 MPa; Light+: 378 MPa; HT: initial: 442; Light+: 361 MPa) sowie für n!ce LT und HT (LT: initial: 234 MPa; Light+: 173 MPa; HT: initial: 220; Light+: 182 MPa) signifikant höhere charakteristische Festigkeitswerte, als mit Befestigungskomposit Light+ versehene Prüfkörper. Für Amber Mill HT (Initial: 332 MPa; Light+: 403 MPa) und Celtra Duo HT (Initial: 189 MPa; Light+: 237 MPa) hingegen, zeigten mit Befestigungskomposit Light+ versehene Prüfkörper signifikant höhere charakteristische Festigkeitswerte, als initial gemessene. Weitergehend konnten keine Unterschiede beobachtet werden (Tabelle 17).

### 7.2.3.3 Initiale charakteristische Festigkeit vs. charakteristische Festigkeit nach Aufbringen des Befestigungskomposits in der Farbe Warm+

Für Initial LRF Block LT (Initial: 167 MPa; Warm+: 148 MPa), IPS e.max CAD LT und HT (LT: initial: 452 MPa; Warm+: 371 MPa; HT: initial: 442; Warm+: 333 MPa) sowie n!ce LT und HT (LT: initial: 234 MPa; Warm+: 158 MPa; HT: initial: 220; Warm+: 167 MPa) zeigten initial gemessene Prüfkörper signifikant höhere charakteristische Festigkeitswerte als

Dr. med. Alicia Mandl

Prüfkörper mit Befestigungskomposit (Warm+). Prüfkörper mit Befestigungskomposit (Warm+) zeigten hingegen für Amber Mill LT und HT (LT: initial: 365 MPa; Warm+: 422 MPa; HT: initial: 332; Warm+: 397 MPa) signifikant höhere Festigkeitswerte als initial gemessene. Außer der genannten konnten keine Unterschiede beobachtet werden (Tabelle 17).

**Tabelle 17:** Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

		Initial	Befestigungskomposit Light+	Befestigungskomposit Warm+
Ker	TS	MW 95%KI	MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	167 <sup>a,B</sup> [159;174]	165 <sup>a</sup> [155;176]	148 <sup>A</sup> [138;157]
	HT	152 <sup>z,Z</sup> [143;161]	147 <sup>z</sup> [141;154]	158 <sup>Z</sup> [150;165]
EM	LT	130 <sup>b,A</sup> [122;137]	118 <sup>a</sup> [108;129]	130 <sup>A</sup> [118;140]
AM	LT	365 <sup>a,A</sup> [318;416]	385 <sup>a</sup> [350;422]	422 <sup>B</sup> [401;443]
	HT	332 <sup>z,Z</sup> [294;374]	403 <sup>y</sup> [378;430]	397 <sup>Y</sup> [376;419]
CD	LT	200 <sup>b,A</sup> [184;217]	184 <sup>a</sup> [168;199]	220 <sup>A</sup> [198;243]
	HT	189 <sup>z,Z</sup> [169;210]	237 <sup>y</sup> [212;263]	201 <sup>Z</sup> [189;213]
IC	LT	452 <sup>b,B</sup> [423;483]	378 <sup>a</sup> [357;399]	371 <sup>A</sup> [359;382]
	HT	442 <sup>y,Y</sup> [404;483]	361 <sup>z</sup> [340;384]	333 <sup>Z</sup> [316;349]
NC	LT	234 <sup>b,B</sup> [216;252]	173 <sup>a</sup> [161;186]	185 <sup>A</sup> [173;197]
	HT	220 <sup>y,Y</sup> [201;241]	182 <sup>z</sup> [166;198]	167 <sup>Z</sup> [153;181]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe LT (Light+) mit kleinen Buchstaben (ab), Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe LT (Warm+) mit großen Buchstaben (AB), Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe HT (Light+) mit kleinen Buchstaben (zy) und Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe HT (Warm+) mit großen Buchstaben (ZY) dargestellt.



### 7.3 Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken

#### 7.3.1 Biaxiale Biegefestigkeit

In einer globalen Analyse zeigte die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,936$ ;  $p<0,001$ ) den größten Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit. Weiterhin zeigten die Interaktionen zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,071$ ;  $p=0,006$ ), zwischen der Silikatkeramik, der Transluzenzstufe und dem Befestigungskomposit ( $\eta_p^2=0,056$ ;  $p=0,001$ ) sowie zwischen der Transluzenzstufe und dem Befestigungskomposit ( $\eta_p^2=0,070$ ;  $p=0,006$ ) in absteigender Reihenfolge einen Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit.

Die gemessenen Gruppen der biaxialen Biegefestigkeit waren normalverteilt und wurden daher parametrisch ausgewertet.

##### 7.3.1.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination der Farbe Light+ des Befestigungskomposits konnten für Amber Mill ( $362\pm 52,9$  MPa) und IPS e.max CAD ( $364\pm 31,2$  MPa;  $p\leq 0,001$ ) die höchsten Biegefestigkeitswerte ermittelt werden ( $p\leq 0,001$ ). Weiterhin lag Celtra Duo ( $174\pm 22,1$  MPa) im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $166\pm 18,0$  MPa;  $p=0,994$ ) und Initial LRF Block ( $159\pm 15,2$  MPa;  $p=0,927$ ). IPS Empress CAD zeigte hier die niedrigsten Werte ( $112\pm 14,7$  MPa;  $p\leq 0,036$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigte Amber Mill die signifikant höchsten Werte ( $408\pm 34,8$  MPa;  $p\leq 0,011$ ). IPS e.max CAD zeigte hier die zweithöchsten Werte ( $363\pm 17,2$  MPa;  $p\leq 0,011$ ). Celtra Duo ( $206\pm 37,0$  MPa) lag im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $178\pm 19,2$  MPa;  $p=0,271$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $178\pm 19,2$  MPa) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $142\pm 13,2$  MPa;  $p=0,079$ ). Initial LRF Block ( $142\pm 13,2$  MPa) zeigte gemeinsam mit IPS Empress CAD ( $123\pm 15,5$  MPa;  $p=0,693$ ) die geringsten Werte ( $p\leq 0,001$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits zählte Amber Mill ( $387\pm 44,6$  MPa) mit IPS e.max CAD ( $347\pm 33,1$

MPa;  $p=0,123$ ) zur Gruppe mit den höchsten Biegefestigkeitswerten ( $p\leq 0,001$ ). Celtra Duo ( $222\pm 38,9$  MPa;  $p\leq 0,031$ ) zeigte die zweithöchsten Werte. Die Silikatkeramik n!ce ( $172\pm 24,4$  MPa) gehörte in dieser Kombination zum gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $143\pm 9,35$  MPa;  $p=0,448$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigte Amber Mill die signifikant höchsten Biegefestigkeitswerte ( $382\pm 33,3$  MPa;  $p\leq 0,001$ ). IPS e.max CAD zeigte die zweithöchsten Werte ( $322\pm 25,1$  MPa;  $p\leq 0,001$ ), während Celtra Duo die dritthöchsten Werte aufwies ( $194\pm 18,0$  MPa;  $p\leq 0,029$ ). Außerdem zählte n!ce ( $158\pm 21,6$  MPa) zum gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $153\pm 11,3$  MPa;  $p=0,992$ ; Tabelle 18).

### 7.3.1.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

Innerhalb der Blöcke, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigten Blöcke der Transluzenzstufe LT ( $159\pm 15,2$  MPa) für Initial LRF Block höhere Biegefestigkeitswerte, als Blöcke der Transluzenzstufe HT ( $143\pm 9,35$  MPa;  $p=0,015$ ). Bei Celtra Duo zeigten Blöcke der Transluzenzstufe HT ( $222\pm 38,9$  MPa) signifikant höhere Biegefestigkeitswerte als Blöcke der Transluzenzstufe LT ( $174\pm 22,1$  MPa;  $p=0,005$ ).

Innerhalb der Blöcke, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigten Blöcke der Transluzenzstufe LT für IPS e.max CAD ( $363\pm 17,2$  MPa) und n!ce ( $178\pm 19,2$  MPa) höhere Werte als Blöcke der Transluzenzstufe HT (IC:  $322\pm 25,1$  MPa;  $p<0,001$ ; NC:  $158\pm 21,6$  MPa;  $p=0,045$ ).

### 7.3.1.3 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits

Innerhalb der Transluzenzstufe LT konnten für Initial LRF Block in Kombination mit der Farbe Light+ ( $159\pm 15,2$  MPa) des Befestigungskomposits höhere Biegefestigkeitswerte ermittelt werden, als für die Kombination mit der Farbe Warm+ ( $142\pm 13,2$  MPa;  $p=0,016$ ). Weiterhin konnten für Amber Mill und Celtra Duo in Kombination mit der Farbe Warm+ (AM:  $408\pm 34,8$  MPa; CD:  $206\pm 37,0$  MPa) des Befestigungskomposits höhere Werte ermittelt werden, als für die Kombination mit der Farbe Light+ (AM:  $362\pm 52,9$  MPa;  $p=0,035$ ; CD:  $174\pm 22,1$  MPa;  $p=0,030$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT konnten keine Unterschiede hinsichtlich der biaxialen Biegefestigkeit beobachtet werden.

**Tabelle 18:** Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Befestigungskomposit Light+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	159 <sup>b,y,II</sup> ±15,2	147	171	134	160
	HT	143 <sup>A,z,I</sup> ±9,35	136	151	129	143
EM	LT	112 <sup>a,I</sup> ±14,7	101	124	90	113
AM	LT	362 <sup>c,z,I</sup> ±52,9	324	401	268	371
	HT	387 <sup>D,z,I</sup> ±44,6	354	420	328	382
CD	LT	174 <sup>b,z,I</sup> ±22,1	157	191	135	180
	HT	222 <sup>C,y,I</sup> ±38,9	193	250	171	227
IC	LT	364 <sup>c,z,I</sup> ±31,2	341	388	303	376
	HT	347 <sup>D,z,I</sup> ±33,1	322	372	270	352
NC	LT	166 <sup>b,z,I</sup> ±18,0	152	180	132	171
	HT	172 <sup>A,z,I</sup> ±24,4	153	190	138	176
Befestigungskomposit Warm+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	142 <sup>a,b,z,I</sup> ±13,2	132	153	116	145
	HT	153 <sup>A,z,I</sup> ±11,3	144	162	137	152
EM	LT	123 <sup>a,I</sup> ±15,5	111	135	93	123
AM	LT	408 <sup>e,z,II</sup> ±34,8	382	434	364	398
	HT	382 <sup>D,z,I</sup> ±33,3	359	407	325	395
CD	LT	206 <sup>c,z,II</sup> ±37,0	179	234	164	196
	HT	194 <sup>B,z,I</sup> ±18,0	180	208	164	198
IC	LT	363 <sup>d,y,I</sup> ±17,2	350	377	331	364
	HT	322 <sup>C,z,I</sup> ±25,1	303	341	274	330
NC	LT	178 <sup>b,c,y,I</sup> ±19,2	163	193	156	173
	HT	158 <sup>A,z,I</sup> ±21,6	142	175	128	158

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe LT Light+: abc, Transluzenzstufe LT Warm+: **abc**) mit kleinen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe HT Light+: ABC, Transluzenzstufe HT Warm+: **ABC**) mit großen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (Light+: zy, Warm+: **zy**) mit kleinen Buchstaben und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (Transluzenzstufe LT: I II, Transluzenzstufe HT: **I II**) mit römischen Zahlen dargestellt.

### 7.3.2 Weibull Modul

#### 7.3.2.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination mit der Farbe Light+ der Befestigungskomposits lagen alle untersuchten Silikatkeramiken im gleichen Wertebereich (Tabelle 19).

Für die Kombination der Transluzenzstufe LT mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigten Amber Mill (14,1) und IPS e.max CAD (23,6) die signifikant

höchsten Zuverlässigkeitswerte. Amber Mill (14,1) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block (11,7), n!ce (11,5) und IPS Empress CAD (8,66). Initial LRF Block (11,7), n!ce (11,5) und IPS Empress CAD (8,66) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo (6,83).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits zeigten Initial LRF Block (17,7), IPS e.max CAD (11,5) und Amber Mill (10,9) die signifikant höchsten Werte, während IPS e.max CAD (11,5) und Amber Mill (10,9) im gleichen Wertebereich lagen wie n!ce (7,98) und Celtra Duo (6,45).

Die Kombination der Transluzenzstufe HT mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigte für Initial LRF Block (16,7), IPS e.max CAD (14,4), Amber Mill (12,8) und Celtra Duo (12,4) die signifikante höchsten Zuverlässigkeitswerte. IPS e.max CAD (14,4), Amber Mill (12,8) und Celtra Duo (12,4) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie n!ce (8,38).

#### **7.3.2.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke**

Es konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke beobachtet werden (Tabelle 19).

#### **7.3.2.3 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits**

Es konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Farbe des Befestigungskomposits beobachtet werden (Tabelle 19).

**Tabelle 19:** Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m)

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Befestigungskomposit Light+	Befestigungskomposit Warm+
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	11,8 <sup>a,z,I</sup> [6,15;22,7]	11,7 <sup>a,b,c,z,I</sup> [6,08;22,4]
	HT	17,7 <sup>B,z,I</sup> [9,23;34,0]	16,7 <sup>B,z,I</sup> [8,70;32,0]
EM	LT	8,46 <sup>a,I</sup> [4,40;16,3]	8,66 <sup>a,b,c,I</sup> [4,51;16,6]
AM	LT	7,36 <sup>a,z,I</sup> [3,83;14,1]	14,1 <sup>b,c,d,z,I</sup> [7,32;27,0]
	HT	10,9 <sup>A,B,z,I</sup> [5,68;21,0]	12,8 <sup>A,z,I</sup> [6,69;24,6]
CD	LT	8,56 <sup>a,z,I</sup> [4,45;16,4]	6,83 <sup>a,z,I</sup> [3,55;13,1]
	HT	6,45 <sup>A,z,I</sup> [3,35;12,4]	12,4 <sup>A,z,I</sup> [6,48;23,7]
IC	LT	12,8 <sup>a,z,I</sup> [6,69;24,6]	23,6 <sup>d,z,I</sup> [12,2;45,3]
	HT	11,5 <sup>A,B,z,I</sup> [6,01;22,2]	14,4 <sup>A,z,I</sup> [7,51;27,7]
NC	LT	10,2 <sup>a,z,I</sup> [5,29;19,5]	11,5 <sup>a,b,z,I</sup> [5,98;22,0]
	HT	7,98 <sup>A,z,I</sup> [4,15;15,3]	8,38 <sup>A,z,I</sup> [4,36;16,1]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe LT Light+: abc, Transluzenzstufe LT Warm+: **abc**) mit kleinen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe HT Light+: ABC, Transluzenzstufe HT Warm+: **ABC**) mit großen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (Light+: zy, Warm+: **zy**) mit kleinen Buchstaben und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (Transluzenzstufe LT: I II, Transluzenzstufe HT: **I II**) mit römischen Zahlen dargestellt.

### 7.3.3 Charakteristische Festigkeit

#### 7.3.3.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits zeigten Amber Mill (385 MPa) und IPS e.max CAD (378 MPa) die signifikant höchsten Festigkeitswerte. Celtra Duo (184 MPa) und n!ce (173 MPa) zeigten die zweithöchsten Werte, während n!ce (173 MPa) ebenfalls im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block (165 MPa) lag. IPS Empress CAD (188 MPa) zeigte die signifikant niedrigsten Werte.

In Kombination mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits lag jede der untersuchten Silikatkeramiken in einem eigenen Wertebereich (Tabelle 20). Amber Mill (422 MPa) zeigte gefolgt von IPS e.max CAD (371 MPa), Celtra Duo (220 MPa), n!ce (185 MPa), Initial LRF Block (148 MPa) und IPS Empress CAD (130 MPa) die höchsten Werte der charakteristischen Festigkeit (Tabelle 20).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Light+ der Befestigungskomposits lag jede der untersuchten Silikatkeramiken in einem eigenen

Wertebereich. Amber Mill (403 MPa) zeigte gefolgt von IPS e.max CAD (361 MPa), Celtra Duo (237 MPa), n!ce (182 MPa) und Initial LRF Block (147 MPa) die signifikant höchsten Werte.

Die Kombination der Transluzenzstufe HT mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits ergab ebenfalls für jede der untersuchten Silikatkeramiken einen eigenen Wertebereich. Amber Mill (397 MPa) zeigte gefolgt von IPS e.max CAD (333 MPa), Celtra Duo (201 MPa), n!ce (167 MPa) und Initial LRF Block (158 MPa) die signifikant höchsten Festigkeitswerte (Tabelle 20).

### **7.3.3.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke**

Innerhalb der mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehenen Blöcke zeigte die Transluzenzstufe LT für Initial LRF Block (LT: 165 MPa, HT: 147 MPa) höhere Werte als die Transluzenzstufe HT. Für Celtra Duo (LT: 184, HT: 237) zeigten Blöcke der Transluzenzstufe HT höhere Werte als Blöcke der Transluzenzstufe LT (Tabelle 20).

Innerhalb der Blöcke, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte die Transluzenzstufe LT für Amber Mill (LT: 422 MPa, HT: 397 MPa), IPS e.max CAD (LT: 371 MPa, HT: 333 MPa), n!ce (LT: 185 MPa, HT: 167 MPa) und Celtra Duo (LT: 220 MPa, HT: 201 MPa) höhere Festigkeitswerte, als die Transluzenzstufe HT. Die Transluzenzstufe HT zeigte für Initial LRF Block (LT: 148, HT: 158) höhere Festigkeitswerte als die Transluzenzstufe LT (Tabelle 20).

### **7.3.3.3 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits**

Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigte die Farbe Light+ des Befestigungskomposits bei Initial LRF Block (Light+: 165 MPa, Warm+: 148 MPa) signifikant höhere Festigkeitswerte, als die Farbe Warm+. Für IPS Empress CAD (Light+: 118 MPa, Warm+: 130 MPa), Amber Mill (Light+: 385 MPa, Warm+: 422 MPa) und Celtra Duo (Light+: 184 MPa, Warm+: 220 MPa) zeigte die Farbe Warm+ signifikant höhere Festigkeitswerte.

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte die Farbe Light+ des Befestigungskomposits für IPS e.max CAD (Light+: 361 MPa, Warm+: 331), n!ce (Light+: 182 MPa, Warm+: 167 MPa) und Celtra Duo (Light+: 237 MPa, Warm+: 201 MPa) signifikant höhere Festigkeitswerte als die Farbe Warm+. Hinsichtlich Initial LRF Block (Light+: 147 MPa, Warm+: 158 MPa) führte die Farbe Warm+ zu signifikant höheren Festigkeitswerten (Tabelle 20).

**Tabelle 20:** Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [MPa]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, 95% KI: 95% Konfidenzintervall. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Ker	TS	Befestigungskomposit Light+	Befestigungskomposit Warm+
		MW 95%KI	MW 95%KI
IL	LT	165 <sup>b,y,II</sup> [155;176]	148 <sup>b,z,I</sup> [138;157]
	HT	147 <sup>A,z,I</sup> [141;154]	158 <sup>A,y,II</sup> [150;165]
EM	LT	118 <sup>a,I</sup> [108;129]	130 <sup>a,II</sup> [118;140]
AM	LT	385 <sup>d,z,I</sup> [350;422]	422 <sup>f,y,II</sup> [401;443]
	HT	403 <sup>E,z,I</sup> [378;430]	397 <sup>E,z,I</sup> [376;419]
CD	LT	184 <sup>e,z,I</sup> [168;199]	220 <sup>d,y,II</sup> [198;243]
	HT	237 <sup>C,y,II</sup> [212;263]	201 <sup>D,z,I</sup> [189;213]
IC	LT	378 <sup>d,z,I</sup> [357;399]	371 <sup>e,y,I</sup> [359;382]
	HT	361 <sup>D,z,II</sup> [340;384]	333 <sup>C,z,I</sup> [316;349]
NC	LT	173 <sup>b,c,z,I</sup> [161;186]	185 <sup>e,y,I</sup> [173;197]
	HT	182 <sup>B,z,II</sup> [166;198]	167 <sup>B,z,I</sup> [153;181]

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe LT Light+: abc, Transluzenzstufe LT Warm+: **abc**) mit kleinen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Keramik (Transluzenzstufe HT Light+: ABC, Transluzenzstufe HT Warm+: **ABC**) mit großen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (Light+: zy, Warm+: **zy**) mit kleinen Buchstaben und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (Transluzenzstufe LT: I II, Transluzenzstufe HT: **I II**) mit römischen Zahlen dargestellt.

### 7.3.4 Transluzenz und Farbwerte (Lab)

### 7.3.5 Transluzenz

In einer globalen Analyse beeinflussten die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,231$ ;  $p<0,001$ ), die Interaktion zwischen Silikatkeramik und Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,188$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt von der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke ( $\eta_p^2=0,139$ ;  $p<0,001$ ) und der Farbe des Befestigungskomposits ( $\eta_p^2=0,047$ ;  $p<0,001$ ) die Transluzenz am stärksten.

Die gemessenen Gruppen waren normalverteilt und wurden deshalb parametrisch ausgewertet.

#### 7.3.5.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe LT, die später mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Amber Mill ( $46,7\pm 2,48\%$ ;  $p<0,001$ ) die höchste Transluzenz. IPS Empress CAD ( $43,7\pm 0,770\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $42,7\pm 0,455\%$ ;  $p=0,635$ ). Außerdem lag n!ce ( $41,0\pm 0,471\%$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $40,6\pm 0,342\%$ ;  $p=0,987$ ) und Celtra Duo ( $40,4\pm 0,612\%$ ;  $p=0,914$ ).

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe LT, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Amber Mill ( $49,2 \pm 1,77\%$ ) die höchsten Transluzenzwerte ( $p < 0,001$ ). Initial LRF Block ( $43,1 \pm 0,324\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie IPS Empress CAD ( $42,3 \pm 0,691\%$ ;  $p = 0,770$ ) und n!ce ( $41,9 \pm 0,309\%$ ;  $p = 0,253$ ). IPS Empress CAD ( $42,3 \pm 0,691\%$ ) lag weiterhin im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $41,9 \pm 0,309\%$ ;  $p = 0,958$ ) und IPS e.max CAD ( $40,8 \pm 0,563\%$ ;  $p = 0,064$ ). IPS e.max CAD ( $40,8 \pm 0,563\%$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $40,0 \pm 1,42\%$ ;  $p = 0,675$ ).

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe HT, die später mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Initial LRF ( $48,9 \pm 0,593\%$ ) die höchsten Transluzenzwerte ( $p < 0,001$ ). IPS e.max CAD ( $45,3 \pm 0,417\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $44,6 \pm 3,05\%$ ;  $p = 0,901$ ) und Celtra Duo ( $43,6 \pm 0,384\%$ ;  $p = 0,204$ ). Die Silikatkeramik n!ce zeigte hier die geringsten Werte ( $41,2 \pm 0,906\%$ ;  $p \leq 0,018$ ).

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe HT, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte IPS e.max CAD ( $49,0 \pm 0,349\%$ ) gemeinsam mit Initial LRF Block ( $47,8 \pm 0,967\%$ ;  $p = 0,306$ ) die höchsten Transluzenzwerte. Amber Mill lag ( $44,4 \pm 1,89\%$ ) im Wertebereich wie Celtra Duo ( $43,5 \pm 0,601\%$ ;  $p = 0,540$ ), während n!ce die niedrigsten Werte zeigte ( $41,4 \pm 1,20\%$ ;  $p \leq 0,004$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT der Gruppen, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Initial LRF Block ( $38,9 \pm 0,675\%$ ) die höchsten Transluzenzwerte ( $p \leq 0,014$ ). Amber Mill ( $37,1 \pm 1,35\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $36,5 \pm 0,863\%$ ;  $p = 0,874$ ) und IPS Empress CAD ( $36,0 \pm 0,949\%$ ;  $p = 0,317$ ). Außerdem lag Celtra Duo ( $36,5 \pm 0,863\%$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS Empress CAD ( $36,0 \pm 0,949\%$ ;  $p = 0,938$ ), IPS e.max CAD ( $35,3 \pm 1,18\%$ ;  $p = 0,239$ ) und n!ce ( $35,0 \pm 0,728\%$ ;  $p = 0,062$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT der Gruppen, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Amber Mill ( $42,8 \pm 2,33\%$ ) die höchsten Transluzenzwerte ( $p \leq 0,004$ ). IPS Empress CAD ( $40,3 \pm 0,685\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $38,9 \pm 0,747\%$ ;  $p = 0,263$ ) und Celtra Duo ( $38,7 \pm 0,586\%$ ;  $p = 0,131$ ). Außerdem lagen IPS e.max CAD ( $35,9 \pm 1,27\%$ ) und n!ce ( $35,8 \pm 0,839\%$ ;  $p < 0,999$ ) im gleichen Wertebereich.

Innerhalb der Transluzenzstufe HT der Gruppen, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, lag Initial LRF Block ( $41,2 \pm 1,51\%$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $41,2 \pm 0,665\%$ ;  $p < 0,999$ ) und Amber Mill



( $38,7 \pm 3,47\%$ ;  $p=0,064$ ). Amber Mill ( $38,7 \pm 3,47\%$ ) gehörte außerdem zum gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $38,0 \pm 1,30\%$ ;  $p=0,069$ ) und n!ce ( $36,3 \pm 0,819\%$ ;  $p=0,092$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT der Gruppen, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Initial LRF Block ( $43,6 \pm 1,75\%$ ) gemeinsam mit IPS e.max CAD ( $43,4 \pm 0,507\%$ ;  $p=0,999$ ) die höchsten Transluzenzwerte ( $p \leq 0,001$ ). Celtra Duo ( $40,6 \pm 0,768\%$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $40,5 \pm 1,77\%$ ;  $p < 0,999$ ), während n!ce die geringsten Transluzenzwerte zeigte ( $37,7 \pm 0,851\%$ ;  $p \leq 0,001$ ).

### 7.3.5.2 Einfluss der Transluzenzstufe de CAD/CAM-Blöcke

Innerhalb initial gemessener Blöcke, die später mit Befestigungskomposit versehen wurden zeigten Blöcke der Transluzenzstufe HT bei Initial LRF Block, Celtra Duo und IPS e.max CAD höhere Transluzenzwerte als Blöcke der Transluzenzstufe LT ( $p < 0,001$ ). Blöcke der Transluzenzstufe LT, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigten für Amber Mill ( $p < 0,001$ ) höhere Transluzenzwerte als Blöcke der Transluzenzstufe HT (Tabelle 21).

Innerhalb mit Befestigungskomposit versehener Blöcke konnten für die Transluzenzstufe HT bei Initial LRF Block, Celtra Duo und IPS e.max CAD für beide Farben des Befestigungskomposits höhere Transluzenzwerte als für die Transluzenzstufe LT ermittelt werden ( $p < 0,001$ ). Für n!ce konnte dies nur für die Farbe Warm+ gezeigt werden ( $p < 0,001$ ). Amber Mill zeigte nach Aufbringen der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits höhere Transluzenzwerte für die Transluzenzstufe LT als für die Transluzenzstufe HT ( $p < 0,001$ ). Nach Aufbringen der Farbe Light+ zeigte die Transluzenzstufe HT höhere Transluzenzwerte ( $p < 0,001$ ; Tabelle 21).

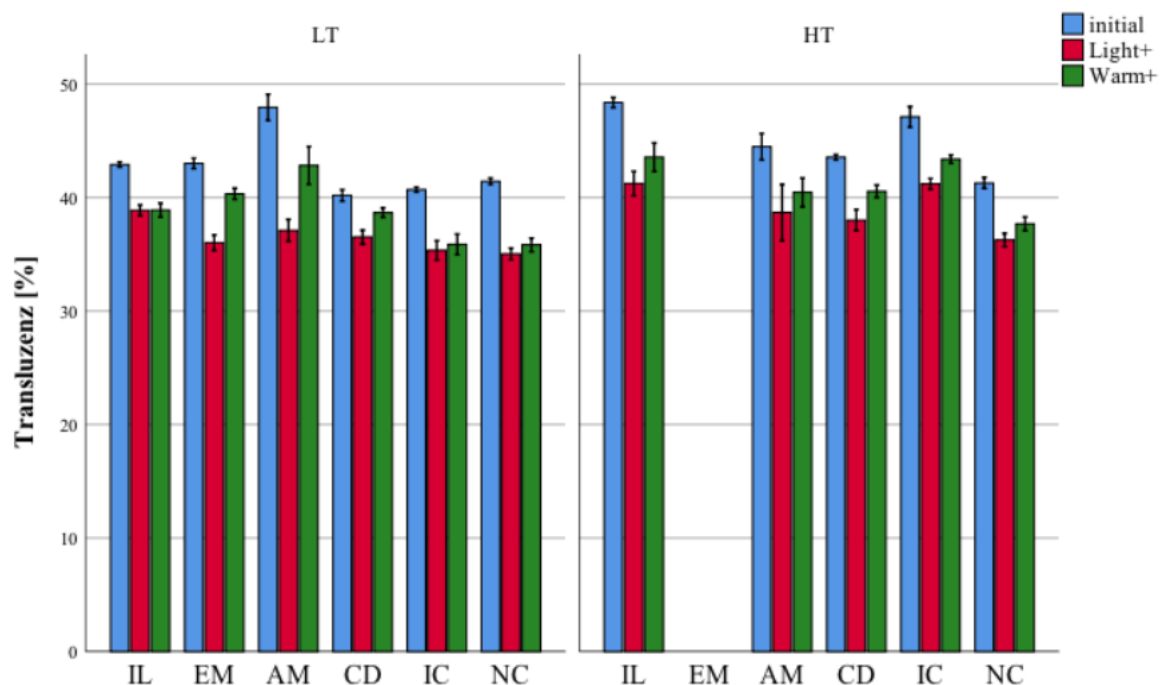
### 7.3.5.3 Einfluss des Befestigungskomposits

Sowohl innerhalb der Transluzenzstufe LT als auch innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigten initial gemessene Prüfkörper signifikant höhere Transluzenzwerte als Prüfkörper, die mit Befestigungskomposit (initial/Light+:  $p \leq 0,001$ ; initial/Warm+:  $p \leq 0,012$ ) versehen worden waren (Tabelle 21).

#### 7.3.5.4 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits

Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigte die Farbe Warm+ des Befestigungskomposits für IPS Empress CAD, Amber Mill, Celtra Duo und n!ce höhere Transluzenzwerte als die Farbe Light+ ( $p \leq 0,035$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte die Farbe Warm+ des Befestigungskomposits für Initial LRF Block, Celtra Duo, IPS e.max CAD und n!ce höhere Transluzenzwerte als die Farbe Light+ ( $p < 0,001$ ; Tabelle 21; Abbildung 30).



**Abbildung 30:** Transluzenz. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 30 zeigt die Mittelwerte der Transluzenz. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

Tabelle 21: Deskriptive Statistiken – Transluzenz [%]

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Stilkatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial													
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	42,7 <sup>bc,II</sup> ±0,455	42,3;43,2	42,2	42,8	43,3	IL	LT	43,1 <sup>ca,2</sup> ±0,324	42,8;43,5	42,5	43,1	43,8
	HT	48,9 <sup>cB,II</sup> ±0,593	48,4;49,4	48,1	48,8	49,7		HT	47,8 <sup>cB,2</sup> ±0,967	47,0;48,4	46,1	47,9	49,2
EM	LT	43,7 <sup>b,II</sup> ±0,770	43,0;44,3	42,6	43,6	45,1	EM	LT	42,3 <sup>bc,2</sup> ±0,691	41,7;42,9	41,3	42,4	43,3
AM	LT	46,7 <sup>cα,II</sup> ±2,48	44,8;46,6	42,0	47,0	50,1	AM	LT	49,2 <sup>d,β,2</sup> ±1,77	47,8;50,6	46,7	49,6	51,6
	HT	44,6 <sup>Bα,II</sup> ±3,05	42,3;46,9	40,5	44,9	50,7		HT	44,4 <sup>Bα,2</sup> ±1,89	42,9;45,8	41,3	44,4	47,5
CD	LT	40,4 <sup>aα,II</sup> ±0,612	39,8;40,9	39,5	40,3	41,4	CD	LT	40,0 <sup>aα,2</sup> ±1,42	38,9;41,1	38,7	39,6	43,4
	HT	43,6 <sup>B,β,II</sup> ±0,384	43,2;44,0	43,0	43,6	44,3		HT	43,5 <sup>dB,2</sup> ±0,601	43,0;43,9	42,6	43,4	44,5
IC	LT	40,6 <sup>aα,II</sup> ±0,342	40,2;40,9	40,1	40,5	41,1	IC	LT	40,8 <sup>abα,2</sup> ±0,563	40,3;41,3	40,0	40,8	41,9
	HT	45,3 <sup>B,β,II</sup> ±0,417	44,9;45,7	44,5	45,2	45,9		HT	49,0 <sup>c,β,2</sup> ±0,349	48,6;49,3	48,5	48,9	49,5
NC	LT	41,0 <sup>aα,II</sup> ±0,471	40,5;41,4	40,3	41,1	41,8	NC	LT	41,9 <sup>bcα,2</sup> ±0,309	41,6;42,2	41,5	41,8	42,6
	HT	41,2 <sup>Aα,II</sup> ±0,906	40,5;42,0	40,0	41,4	42,2		HT	41,4 <sup>Aα,2</sup> ±1,20	40,4;42,3	39,6	41,5	43,0
Befestigungskomposit Light+							Befestigungskomposit Warm+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	38,9 <sup>a,6,II</sup> ±0,675	38,3;39,5	37,6	38,7	39,9	IL	LT	38,9 <sup>a,6,II</sup> ±0,747	38,2;39,6	37,2	38,9	40,3
	HT	41,2 <sup>Y,5,II</sup> ±1,51	40,1;42,4	39,3	41,5	43,4		HT	43,6 <sup>Y,5,II</sup> ±1,75	43,2;44,9	41,4	43,3	46,0
EM	LT	36,0 <sup>cY,II</sup> ±0,949	35,2;36,8	34,1	36,1	37,2	EM	LT	40,3 <sup>Y,II</sup> ±0,685	39,7;40,9	39,5	40,2	41,3
AM	LT	37,1 <sup>Y,6,II</sup> ±1,35	36,0;38,2	34,6	36,9	39,3	AM	LT	42,8 <sup>5,II</sup> ±2,33	41,1;44,6	40,6	42,2	47,7
	HT	38,7 <sup>ZY,6,II</sup> ±3,47	36,1;41,3	32,8	38,4	43,5		HT	40,5 <sup>Y,6,II</sup> ±1,77	39,1;41,8	38,0	40,4	43,9
CD	LT	36,5 <sup>ZY,6,II</sup> ±0,863	35,8;37,2	34,8	36,4	37,7	CD	LT	38,7 <sup>Y,5,II</sup> ±0,586	38,3;39,2	37,9	38,5	39,8
	HT	38,0 <sup>Z,5,II</sup> ±1,30	37,0;39,0	36,6	37,6	40,3		HT	40,6 <sup>Y,6,II</sup> ±0,768	39,9;41,2	39,3	40,7	42,0
IC	LT	35,3 <sup>Z,6,II</sup> ±1,18	34,4;36,3	34,0	35,2	37,7	IC	LT	35,9 <sup>Z,5,II</sup> ±1,27	34,9;36,9	33,8	36,2	37,2
	HT	41,2 <sup>Y,5,II</sup> ±0,665	40,6;41,8	40,1	41,2	42,3		HT	43,4 <sup>X,6,II</sup> ±0,507	42,9;43,8	42,7	43,2	44,2
NC	LT	35,0 <sup>c,6,II</sup> ±0,728	34,4;35,7	33,7	35,2	35,8	NC	LT	35,8 <sup>Z,5,II</sup> ±0,839	35,2;36,4	34,7	35,5	37,2
	HT	36,3 <sup>Z,5,II</sup> ±0,819	35,6;36,9	34,8	36,3	37,7		HT	37,7 <sup>Z,6,II</sup> ±0,851	37,0;38,4	35,9	37,9	38,8

Gruppen gleicher Zeichen liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe LT (Light+: *zyx*, Warm+: *zyx*) und HT (Light+: *abc*, Warm+: *abe*) und HT (Light+: *ABC*, Warm+: *ABC*) initial, Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe LT (Light+: *zyx*, Warm+: *zyx*) mit Befestigungskomposit, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (initial Light+: *αβγ*, initial Warm+: *αβγ*, befestigt Light+: *654*, befestigt Warm+: *654*) und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (LT initial/Light+: *I II III*, HT initial/Light+: *I II III*, HT initial/Warm+: *123*, LT Light+/Warm+: *i ii iii*, HT Light+/Warm+: *i ii iii*) mit entsprechenden Zeichen dargestellt.

### 7.3.6 Korrelationen zwischen Transluzenz- und Farbwerten

Mithilfe einer Korrelationsanalyse nach Pearson konnten Korrelationen zwischen der Transluzenz und dem L-Wert, zwischen der Transluzenz und der Transluzenzänderung sowie zwischen dem L-Wert und der Transluzenzänderung ermittelt werden. Eine positive Korrelation zwischen Transluzenz und L-Wert konnte ( $r=0,440$ ;  $p<0,001$ ) beobachtet werden. Außerdem wurde nach dem Aufbringen des Befestigungskomposits eine negative Korrelation jeweils zwischen dem L-Wert ( $r=-0,345$ ) bzw. der Transluzenz ( $r=-0,336$ ) und der Transluzenzänderung ( $p\leq 0,001$ ) ermittelt.

### 7.3.7 L-Wert

In einer globalen Analyse beeinflussten die Wahl der Silikatkeramik ( $\eta_p^2=0,265$ ;  $p<0,001$ ), die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und der Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,185$ ;  $p<0,001$ ) gefolgt von der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke ( $\eta_p^2=0,135$ ;  $p<0,001$ ) und der Farbe des Befestigungskomposits ( $\eta_p^2=0,068$ ;  $p<0,001$ ) den L-Wert in absteigender Reihenfolge. Die Interaktion zwischen der Silikatkeramik, der Transluzenzstufe und dem Befestigungskomposit ( $\eta_p^2=0,028$ ;  $p=0,019$ ) war ebenfalls signifikant, zeigte jedoch den geringsten Einfluss auf den L-Wert. Die gemessenen Gruppen waren normalverteilt und wurden deshalb parametrisch ausgewertet.

#### 7.3.7.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe LT, die später mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Amber Mill ( $76,0\pm 1,61$ ) die signifikant höchsten L-Werte ( $p<0,001$ ). IPS Empress CAD ( $73,6\pm 0,487$ ) lag in einem Wertebereich mit Initial LRF Block ( $72,9\pm 0,416$ ;  $p=0,423$ ). Initial LRF Block ( $72,9\pm 0,416$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $71,8\pm 0,317$ ;  $p=0,060$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $71,8\pm 0,317$ ) lag weiterhin mit IPS e.max CAD ( $71,5\pm 0,232$ ;  $p=0,985$ ) und Celtra Duo ( $71,5\pm 0,397$ ;  $p=0,977$ ) im gleichen Wertebereich.

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe LT, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Amber Mill ( $77,6\pm 1,28$ ) die signifikant höchsten L-Werte ( $p<0,001$ ). Initial LRF Block ( $73,1\pm 0,265$ ) zeigte gemeinsam mit IPS Empress CAD ( $72,8\pm 0,450$ ;  $p=0,961$ ) und n!ce ( $72,3\pm 0,203$ ;  $p=0,216$ ) die zweithöchsten Werte. Die Silikatkeramik n!ce ( $72,3\pm 0,203$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $71,7\pm 0,404$ ;  $p=0,402$ ). Celtra Duo zeigte die niedrigsten Werte ( $70,3\pm 0,417$ ;  $p<0,001$ ).

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe HT, die später mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte Initial LRF Block ( $76,5 \pm 0,351$ ) die höchsten L-Werte ( $p \leq 0,002$ ). IPS e.max CAD ( $74,4 \pm 0,259$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $74,2 \pm 2,20$ ;  $p = 0,996$ ) und Celtra Duo ( $73,5 \pm 0,244$ ;  $p = 0,525$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $71,9 \pm 0,590$ ) zeigte hier die geringsten Werte ( $p \leq 0,022$ ).

Innerhalb initial gemessener Gruppen der Transluzenzstufe HT, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigte IPS e.max CAD ( $76,8 \pm 0,216$ ) gemeinsam mit Initial LRF Block ( $75,8 \pm 0,525$ ;  $p = 0,121$ ) die höchsten L-Werte ( $p \leq 0,004$ ). Amber Mill ( $74,4 \pm 1,33$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $73,5 \pm 0,400$ ;  $p = 0,164$ ), während n!ce ( $72,0 \pm 0,837$ ) die geringsten Werte zeigte ( $p \leq 0,002$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT der Gruppen, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Initial LRF Block ( $70,4 \pm 0,500$ ) gemeinsam mit Amber Mill ( $69,5 \pm 1,03$ ;  $p = 0,269$ ) die höchsten L-Werte ( $p \leq 0,004$ ). Amber Mill ( $69,5 \pm 1,03$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $68,0 \pm 0,682$ ;  $p = 0,605$ ) und IPS Empress CAD ( $68,6 \pm 0,821$ ;  $p = 0,230$ ). Celtra Duo ( $68,0 \pm 0,682$ ) lag weiterhin im gleichen Wertebereich wie IPS Empress CAD ( $68,6 \pm 0,821$ ;  $p = 0,988$ ), IPS e.max CAD ( $67,9 \pm 0,915$ ;  $p = 0,192$ ) und n!ce ( $67,7 \pm 0,628$ ;  $p = 0,072$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT der Gruppen, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Amber Mill ( $73,6 \pm 1,57$ ) die höchsten L-Werte ( $p \leq 0,001$ ). IPS Empress ( $71,7 \pm 0,418$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $71,4 \pm 0,646$ ;  $p = 0,984$ ) und Initial LRF Block ( $70,7 \pm 0,540$ ;  $p = 0,204$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $68,6 \pm 0,605$ ) zeigte gemeinsam mit IPS e.max CAD ( $68,4 \pm 0,986$ ;  $p < 0,999$ ) die geringsten Werte ( $p \leq 0,001$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT der Gruppen, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, lag Initial LRF Block ( $71,9 \pm 1,03$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $71,5 \pm 0,781$ ;  $p = 0,992$ ), Amber Mill ( $71,0 \pm 2,96$ ;  $p = 0,811$ ) und Celtra Duo ( $69,9 \pm 0,932$ ;  $p = 0,084$ ). Celtra Duo ( $69,9 \pm 0,93$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $68,5 \pm 0,607$ ;  $p = 0,465$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT der Gruppen, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte Initial LRF Block ( $74,2 \pm 0,889$ ) gemeinsam mit IPS e.max CAD ( $73,6 \pm 0,337$ ;  $p = 0,605$ ) die höchsten L-Werte ( $p \leq 0,002$ ). Amber Mill ( $72,0 \pm 1,25$ ) lag im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $71,9 \pm 0,496$ ;  $p = 0,998$ ), während n!ce ( $69,7 \pm 0,656$ ) die geringsten L-Werte zeigte ( $p \leq 0,001$ ).

### 7.3.7.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

Innerhalb initial gemessener Blöcke, die später mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigten Blöcke der Transluzenzstufe HT für Initial LRF Block, Celtra Duo, IPS e.max CAD und n!ce höhere L-Werte als Blöcke der Transluzenzstufe LT ( $p \leq 0,002$ ; Tabelle 22).

Innerhalb initial gemessener Blöcke, die später mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, zeigten Blöcke der Transluzenzstufe HT für Initial LRF Block, Celtra Duo und IPS e.max CAD höhere L-Werte als Blöcke der Transluzenzstufe LT. Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Amber Mill höhere L-Werte als Blöcke der Transluzenzstufe HT ( $p < 0,001$ ; Tabelle 22).

Innerhalb mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehener Blöcke führte die Transluzenzstufe HT für Initial LRF Block, Celtra Duo, IPS e.max CAD und n!ce zu höheren L-Werten als die Transluzenzstufe LT ( $p \leq 0,014$ ; Tabelle 22).

Innerhalb mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehener Blöcke führte die Transluzenzstufe HT bei Initial LRF Block, IPS e.max CAD und n!ce zu höheren L-Werten als die Transluzenzstufe LT. Die Transluzenzstufe LT führte bei Amber Mill zu höheren L-Werten als die Transluzenzstufe HT ( $p \leq 0,019$ ; Tabelle 22).

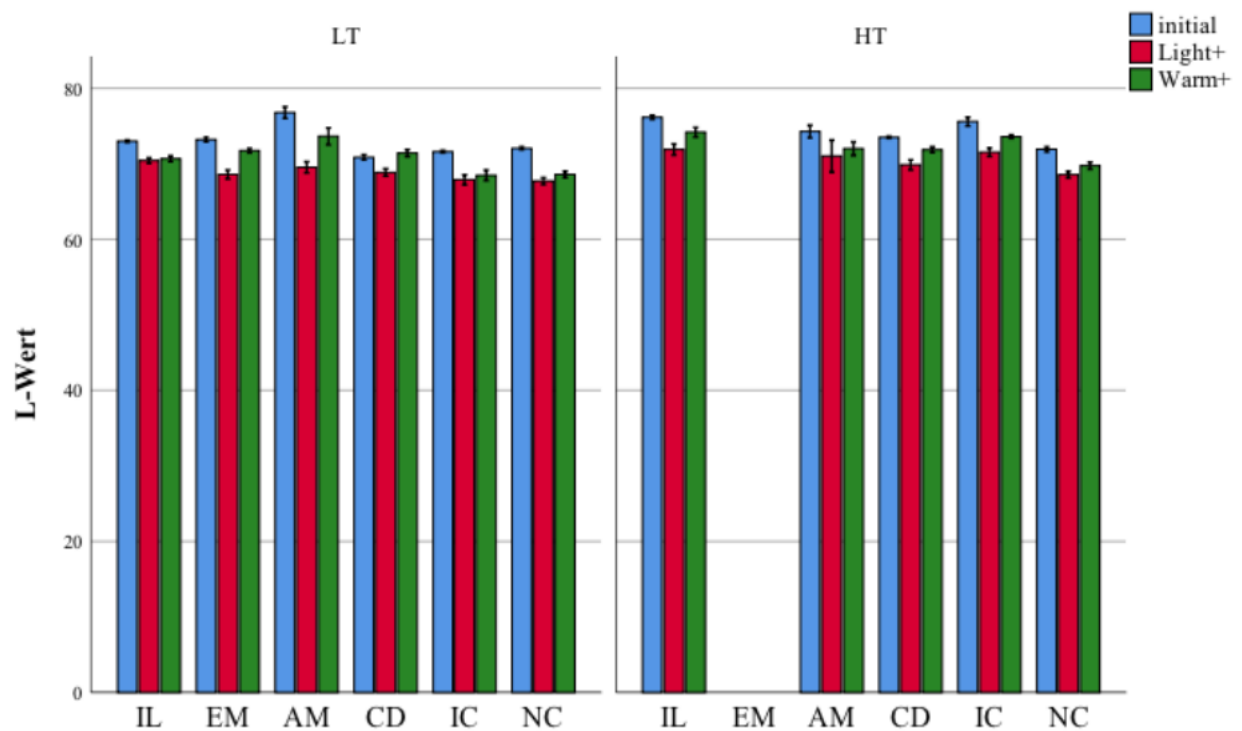
### 7.3.7.3 Einfluss des Befestigungskomposits

Sowohl innerhalb der Transluzenzstufe LT als auch innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigten initial gemessene Prüfkörper signifikant höhere L-Werte als Prüfkörper, die mit Befestigungskomposit versehen worden waren (initial/Light+:  $p \leq 0,014$ ; initial/Warm+:  $p \leq 0,001$ ; Tabelle 22).

### 7.3.7.4 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits

Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigte die Farbe Warm+ des Befestigungskomposits für IPS Empress CAD, Amber Mill, Celtra Duo und n!ce höhere L-Werte als die Farbe Light+ ( $p \leq 0,006$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT zeigte die Farbe Warm+ des Befestigungskomposits für Initial LRF Block, Celtra Duo, IPS e.max CAD und n!ce höhere L-Werte als die Farbe Light+ ( $p \leq 0,001$ ; Tabelle 22, Abbildung 31).



**Abbildung 31:** L-Wert. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Abbildung 31 zeigt die Mittelwerte des L-Werts. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.

Ergebnisse

Tabelle 22: Deskriptive Statistiken – L-Wert

mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Stilkatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Initial													
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	72,9 <sup>b,c,d</sup> ±0,416	72,5;73,3	72,2	72,9	73,5	IL	LT	73,1 <sup>a,c,d</sup> ±0,265	72,7;73,4	72,7	73,1	73,5
	HT	76,5 <sup>c,d</sup> ±0,351	76,1;76,8	78,0	76,4	77,0		HT	75,8 <sup>c,d</sup> ±0,525	75,3;76,3	75,2	75,7	76,7
EM	LT	73,6 <sup>a,d</sup> ±0,487	73,2;74,0	73,0	73,6	74,5	EM	LT	72,8 <sup>c,d</sup> ±0,450	72,4;73,1	72,1	72,8	73,4
	LT	76,0 <sup>c,d</sup> ±1,61	74,7;77,2	73,0	76,2	78,2	AM	LT	77,6 <sup>d</sup> ±1,28	76,5;78,5	75,9	77,4	78,9
AM	LT	74,2 <sup>B,a,d</sup> ±2,20	72,5;75,9	71,6	73,8	78,5		HT	74,4 <sup>B,d</sup> ±1,33	73,3;75,4	72,4	74,2	76,5
	HT	71,5 <sup>a,c,d</sup> ±0,397	71,1;71,8	70,9	71,4	72,1	CD	LT	70,3 <sup>a,c,d</sup> ±0,417	69,8;70,7	69,7	70,1	71,1
CD	LT	73,5 <sup>B,d</sup> ±0,244	73,3;73,8	73,1	73,6	74,0		HT	73,5 <sup>B,d</sup> ±0,400	73,0;73,7	72,8	73,4	74,1
	LT	71,5 <sup>a,c,d</sup> ±0,232	71,3;71,6	71,2	71,5	71,8	IC	LT	71,7 <sup>b,c,d</sup> ±0,404	71,5;72,0	71,4	71,6	72,5
IC	LT	74,4 <sup>B,d</sup> ±0,259	74,1;74,7	73,9	74,4	74,8		HT	76,8 <sup>c,d</sup> ±0,216	76,5;77,0	76,4	76,7	77,0
NC	LT	71,8 <sup>a,b,c,d</sup> ±0,317	71,4;72,0	71,3	71,8	72,3	NC	LT	72,3 <sup>b,c,d</sup> ±0,203	72,1;72,6	72,1	72,3	72,8
	HT	71,9 <sup>a,c,d</sup> ±0,590	71,4;72,4	71,1	72,0	72,5		HT	72,0 <sup>a,c,d</sup> ±0,837	71,2;72,6	70,6	72,0	73,1
Befestigungskomposit Light+							Befestigungskomposit Warm+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	70,4 <sup>a,d</sup> ±0,500	69,9;70,9	69,5	70,3	71,1	IL	LT	70,7 <sup>a,d</sup> ±0,540	70,2;71,1	69,6	70,8	71,5
	HT	71,9 <sup>a,d</sup> ±1,03	71,0;72,7	70,6	72,1	73,3		HT	74,2 <sup>X</sup> ±0,889	73,4;74,9	72,8	74,3	75,3
EM	LT	68,6 <sup>a,d</sup> ±0,821	67,9;69,3	66,9	68,7	69,6	EM	LT	71,7 <sup>a,d</sup> ±0,418	71,3;71,9	71,2	71,6	72,3
	LT	69,5 <sup>a,d</sup> ±1,03	68,7;70,4	67,6	69,3	71,2	AM	LT	73,6 <sup>a,d</sup> ±1,57	72,4;74,9	72,0	73,2	76,8
CD	LT	71,0 <sup>a,d</sup> ±2,96	68,8;73,0	66,2	70,4	75,5		HT	72,0 <sup>a,d</sup> ±1,25	71,0;73,0	70,2	72,0	74,4
	LT	68,9 <sup>a,d</sup> ±0,682	68,3;69,4	67,5	68,8	69,8	CD	LT	71,4 <sup>a,d</sup> ±0,646	70,8;72,0	70,7	71,2	72,6
IC	LT	69,9 <sup>a,d</sup> ±0,932	69,1;70,6	68,8	69,5	71,5		HT	71,9 <sup>a,d</sup> ±0,496	71,4;72,3	71,0	72,0	72,8
	LT	67,9 <sup>a,d</sup> ±0,915	67,1;68,6	66,8	67,8	69,6	IC	LT	68,4 <sup>a,d</sup> ±0,968	67,6;68,9	66,9	68,7	69,6
NC	LT	71,5 <sup>a,d</sup> ±0,781	70,8;72,2	70,2	71,5	72,8		HT	73,6 <sup>X</sup> ±0,337	73,3;73,9	73,2	73,5	74,1
	LT	67,7 <sup>a,d</sup> ±0,628	67,2;68,3	66,6	67,8	68,4	NC	LT	68,6 <sup>a,d</sup> ±0,605	68,0;69,1	67,7	68,5	69,5
	LT	68,5 <sup>a,d</sup> ±0,607	68,0;69,0	67,3	68,6	69,6		HT	69,7 <sup>a,d</sup> ±0,656	69,2;70,3	68,3	69,9	70,5

Gruppen gleicher Zeichen liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe LT (Light+: zyX, Warm+: zyX) und HT (Light+: ABC, Warm+: ABC) initial, Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe LT (Light+: zyX, Warm+: zyX) mit Befestigungskomposit, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (initial Light+: αβγ, initial Warm+: αβγ, befestigt Light+: 654, befestigt Warm+: 654) und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (LT initial/Light+: I II III, HT initial/Light+: 123, LT initial/Warm+: 123, LT Light+/Warm+: i ii iii, HT Light+/Warm+: i ii iii) mit entsprechenden Zeichen dargestellt.



### 7.3.8 Transluzenz- und Farbänderung

In einer globalen Analyse beeinflusste die Wahl der Silikatkeramik (Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,242$ ;  $p\leq 0,001$ ; Farbänderung:  $\eta_p^2=0,155$ ;  $p\leq 0,001$ ) die Transluzenz- und Farbänderung am stärksten. Außerdem zeigten die Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke ( $\eta_p^2=0,050$ ;  $p=0,001$ ) und die Interaktion zwischen Silikatkeramik und Transluzenzstufe ( $\eta_p^2=0,175$ ;  $p\leq 0,001$ ) einen Einfluss auf die Farbänderung. Die Farbe des Befestigungskomposits ( $\eta_p^2=0,249$ ;  $p\leq 0,001$ ) sowie die Interaktion zwischen der Silikatkeramik und dem Befestigungskomposit (Transluzenzänderung:  $\eta_p^2=0,218$ ;  $p\leq 0,001$ ) zeigten einen Einfluss auf die Transluzenzänderung.

Die gemessenen Gruppen waren normalverteilt und wurden deshalb parametrisch ausgewertet.

#### 7.3.8.1 Einfluss der Silikatkeramik

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits Amber Mill ( $9,57\pm 3,07\%$ ) gemeinsam mit IPS Empress CAD ( $7,66\pm 1,11\%$ ;  $p=0,199$ ) die höchste Transluzenzänderung ( $p\leq 0,045$ ). IPS Empress CAD ( $7,66\pm 1,11\%$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie n!ce ( $5,94\pm 0,840\%$ ;  $p=0,311$ ). Weitergehend lag n!ce ( $5,94\pm 0,840\%$ ) im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $5,23\pm 1,44\%$ ;  $p=0,957$ ), Initial LRF Block ( $3,86\pm 0,690\%$ ;  $p=0,128$ ) und Celtra Duo ( $3,84\pm 0,697\%$ ;  $p=0,121$ ).

Hinsichtlich der Farbänderung lag IPS Empress CAD ( $6,66\pm 0,826$ ) im gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $6,55\pm 1,99$ ;  $p<0,999$ ) und n!ce ( $5,58\pm 0,377$ ;  $p=0,403$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $5,58\pm 0,377$ ) lag außerdem im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD ( $4,68\pm 1,14$ ;  $p=0,525$ ) und Initial LRF Block ( $3,97\pm 0,549$ ;  $p=0,053$ ). IPS e.max CAD ( $4,68\pm 1,14$ ) und Initial LRF Block ( $3,97\pm 0,549$ ) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $3,31\pm 0,487$ ;  $p\leq 0,853$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe LT in Kombination mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigte Amber Mill ( $6,40\pm 2,19\%$ ) gemeinsam mit n!ce ( $6,05\pm 0,844\%$ ;  $p=0,997$ ) und IPS e.max CAD ( $4,96\pm 1,27\%$ ;  $p=0,324$ ) die höchste Transluzenzänderung ( $p\leq 0,023$ ). Die Silikatkeramik n!ce ( $6,05\pm 0,844\%$ ) und IPS e.max CAD ( $4,96\pm 1,27\%$ ) lagen weiterhin im gleichen Wertebereich wie Initial LRF Block ( $4,18\pm 0,968\%$ ;  $p\leq 0,875$ ). Außerdem

lagen IPS Empress CAD ( $2,01 \pm 0,932\%$ ) und Celtra Duo ( $1,35 \pm 1,12\%$ ;  $p=0,934$ ) in einem Wertebereich.

Hinsichtlich der Farbänderung lag n!ce ( $7,44 \pm 0,939$ ) gemeinsam mit IPS e.max CAD ( $6,90 \pm 1,56$ ;  $p=0,974$ ), Amber Mill ( $5,74 \pm 1,58$ ;  $p=0,169$ ) und Initial LRF Block ( $5,64 \pm 1,63$ ;  $p=0,124$ ) im höchsten Wertebereich ( $p \leq 0,047$ ). Amber Mill ( $5,74 \pm 1,58$ ) und Initial LRF Block ( $5,64 \pm 1,63$ ) lagen außerdem im gleichen Wertebereich wie Celtra Duo ( $4,01 \pm 1,17$ ;  $p \leq 0,245$ ). Celtra Duo ( $4,01 \pm 1,17$ ) gehörte gemeinsam mit IPS Empress CAD ( $3,57 \pm 0,887$ ;  $p=0,981$ ) zur Gruppe mit der geringsten Farbänderung ( $p \leq 0,047$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits lag Initial LRF Block (Transluzenzänderung:  $7,67 \pm 1,39\%$ ; Farbänderung:  $5,96 \pm 0,996$ ) gemeinsam mit Amber Mill (Transluzenzänderung:  $5,90 \pm 5,07\%$ ;  $p=0,641$ ; Farbänderung:  $4,23 \pm 2,42$ ;  $p=0,096$ ), Celtra Duo (Transluzenzänderung:  $5,61 \pm 1,54\%$ ;  $p=0,496$ ; Farbänderung:  $4,36 \pm 0,981$ ;  $p=0,146$ ) und n!ce (Transluzenzänderung:  $4,95 \pm 0,872\%$ ;  $p=0,220$ ; Farbänderung:  $4,21 \pm 0,679$ ;  $p=0,088$ ) im höchsten Wertebereich hinsichtlich der Transluzenz ( $p \leq 0,045$ )- und Farbänderung ( $p \leq 0,041$ ). Amber Mill (Transluzenzänderung:  $5,90 \pm 5,07\%$ ; Farbänderung:  $4,23 \pm 2,42$ ), Celtra Duo (Transluzenzänderung:  $5,61 \pm 1,54\%$ ; Farbänderung:  $4,36 \pm 0,981$ ) und n!ce (Transluzenzänderung:  $5,61 \pm 1,54\%$ ; Farbänderung:  $4,36 \pm 0,981$ ) lagen weiterhin im gleichen Wertebereich wie IPS e.max CAD (Transluzenzänderung:  $4,04 \pm 0,649\%$ ;  $p \leq 0,954$ ; Farbänderung:  $3,99 \pm 0,751$ ;  $p \leq 0,998$ ).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT in Kombination mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits zeigte IPS e.max CAD ( $5,59 \pm 0,630\%$ ) gemeinsam mit Initial LRF Block ( $4,28 \pm 1,84\%$ ;  $p=0,314$ ) und Amber Mill ( $3,93 \pm 1,57\%$ ;  $p=0,116$ ) die höchste Transluzenzänderung ( $p \leq 0,048$ ). Initial LRF Block ( $4,28 \pm 1,84\%$ ) gehörte weiterhin zum gleichen Wertebereich wie Amber Mill ( $3,93 \pm 1,57\%$ ;  $p=0,986$ ), n!ce ( $3,68 \pm 1,15\%$ ;  $p=0,903$ ) und Celtra Duo ( $2,93 \pm 1,09\%$ ;  $p=0,283$ ).

Hinsichtlich der Farbänderung lagen für die Kombination aus der Transluzenzstufe HT mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits alle untersuchten Silikatkeramiken im gleichen Wertebereich (Tabelle 23).

### 7.3.8.2 Einfluss der Transluzenzstufe der CAD/CAM-Blöcke

Innerhalb der Blöcke, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigte die Transluzenzstufe LT für Amber Mill (nur Farbänderung;  $p=0,032$ ), IPS e.max

CAD (nur Transluzenzänderung;  $p=0,034$ ) und n!ce (Transluzenzänderung:  $p=0,019$ ; Farbänderung:  $p<0,001$ ) höhere Werte als die Transluzenzstufe HT (Tabelle 23).

Mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehene Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für Initial LRF Block (Transluzenzänderung:  $p<0,001$ ; Farbänderung:  $p<0,001$ ) und Celtra Duo (Transluzenzänderung:  $p=0,004$ ; Farbänderung:  $p=0,009$ ) höhere Werte der Transluzenz- und Farbänderung als Blöcke der Transluzenzstufe LT (Tabelle 23).

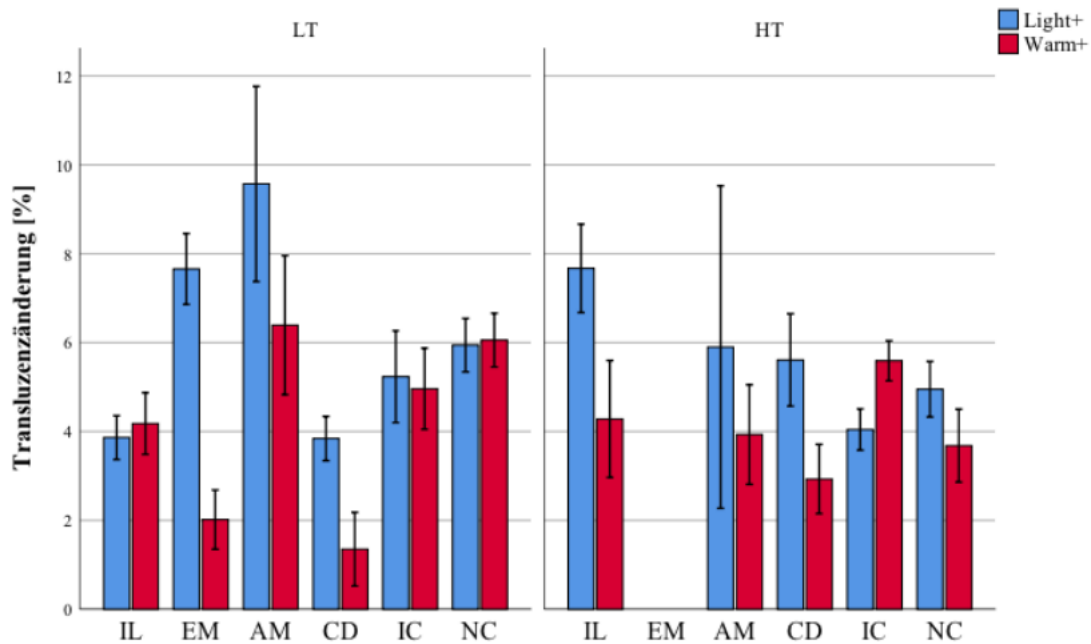
Innerhalb der Blöcke, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, zeigten Blöcke der Transluzenzstufe LT für Amber Mill (Transluzenzänderung:  $p=0,010$ ; Farbänderung:  $p=0,027$ ), IPS e.max CAD (Farbänderung:  $p=0,034$ ) und n!ce (Transluzenzänderung:  $p<0,001$ ; Farbänderung:  $p=0,001$ ) höhere Werte als die Transluzenzstufe HT. Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten für Celtra Duo (Transluzenzänderung:  $p=0,006$ ; Tabelle 23) höhere Werte als Blöcke der Transluzenzstufe LT.

### 7.3.8.3 Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits

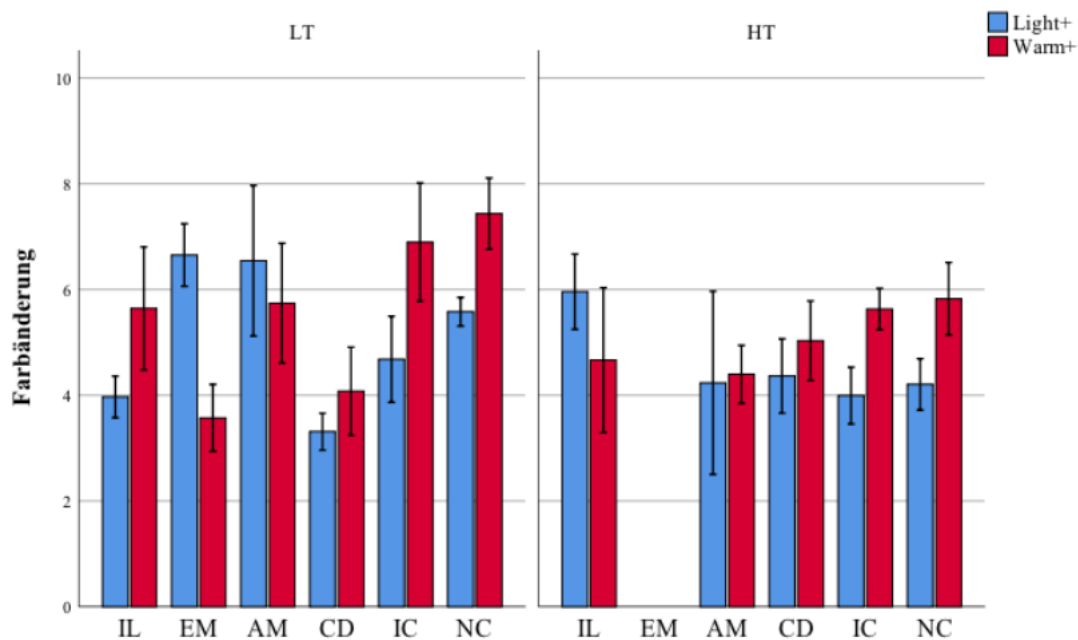
Innerhalb der Transluzenzstufe LT zeigte die Farbe Light+ des Befestigungskomposits für IPS Empress CAD ( $p<0,001$ ), Amber Mill ( $p=0,016$ ) und Celtra Duo ( $p<0,001$ ) höhere Werte der Transluzenzänderung als die Farbe Warm+. Hinsichtlich der Farbänderung zeigte die Farbe Light+ für IPS Empress CAD ( $p<0,001$ ) höhere Werte als die Farbe Warm+, während die Farbe Warm+ bei Initial LRF Block ( $p=0,010$ ), IPS e.max CAD ( $p<0,001$ ) und n!ce ( $p<0,001$ ) eine höhere Farbänderung verursachte, als die Farbe Light+ (Tabelle 23).

Innerhalb der Transluzenzstufe HT führte die Verwendung der Farbe Light+ des Befestigungskomposits bei Initial LRF Block ( $p<0,001$ ), Celtra Duo ( $p<0,001$ ), IPS e.max CAD ( $p<0,001$ ) und n!ce ( $p=0,012$ ) zu einer größeren Transluzenzänderung, als die Farbe Warm+. Hinsichtlich der Farbänderung führte die Farbe Warm+ bei IPS e.max CAD ( $p<0,001$ ) und n!ce ( $p<0,001$ ) zu einer größeren Farbänderung als die Farbe Light+ (Tabelle 23).

Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Transluzenz- bzw. Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbe des Befestigungskomposits. Der Fehlerbalken gibt hierbei das 95% Konfidenzintervall an.



**Abbildung 32:** Transluzenzänderung in Abhängigkeit von der Farbe des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.



**Abbildung 33:** Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbe des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

**Tabelle 23:** Deskriptive Statistiken – Transluzenzänderung [%] und Farbänderung ΔE nach Aufbringen des Befestigungskomposits mit Ker: Keramik, TS: Transluzenzstufe, MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, 95% KI: 95% Konfidenzintervall, Min: Minimum, Med: Median, Max: Maximum. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.

Transluzenzänderung Light+							Farbänderung ΔE Light+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	3,86 <sup>a,z,I</sup> ±0,690	3,36;4,37	2,58	3,88	4,76	IL	LT	3,97 <sup>a,b,z,I</sup> ±0,549	3,56;4,37	3,15	4,02	4,86
	HT	7,67 <sup>A,y,I</sup> ±1,39	6,66;8,68	5,45	7,28	10,0	HT	HT	5,96 <sup>B,y,I</sup> ±0,996	5,23;6,66	4,54	5,81	7,39
EM	LT	7,66 <sup>b,c,I</sup> ±1,11	6,85;8,46	6,08	7,38	10,2	EM	LT	6,66 <sup>c,I</sup> ±0,826	6,05;7,25	5,60	6,53	8,60
AM	LT	9,57 <sup>c,z,I</sup> ±3,07	7,36;11,8	2,74	9,79	13,3	AM	LT	6,55 <sup>c,y,I</sup> ±1,99	5,11;7,98	2,22	6,61	9,02
	HT	5,90 <sup>A,B,z,I</sup> ±5,07	2,26;9,54	-0,170	5,33	16,3	HT	HT	4,23 <sup>A,B,z,I</sup> ±2,42	2,49;5,98	0,90	4,28	7,72
CD	LT	3,84 <sup>a,z,I</sup> ±0,697	3,33;4,35	2,94	3,72	4,89	CD	LT	3,31 <sup>a,z,I</sup> ±0,487	2,95;3,67	2,72	3,26	4,10
	HT	5,61 <sup>A,B,y,I</sup> ±1,54	4,56;6,66	2,84	6,11	4,56	HT	HT	4,36 <sup>A,B,y,I</sup> ±0,981	3,65;5,06	2,47	4,77	5,56
IC	LT	5,23 <sup>a,y,I</sup> ±1,44	4,19;6,27	2,48	5,40	6,80	IC	LT	4,68 <sup>a,b,z,I</sup> ±1,14	3,86;5,49	2,33	4,72	5,92
	HT	4,04 <sup>A,z,I</sup> ±0,649	3,57;4,52	2,77	3,98	5,02	HT	HT	3,99 <sup>A,z,I</sup> ±0,751	3,45;4,54	3,12	3,71	5,31
NC	LT	5,94 <sup>a,b,y,I</sup> ±0,840	5,33;6,55	4,72	5,95	7,40	NC	LT	5,58 <sup>b,c,y,I</sup> ±0,377	5,30;5,86	5,07	5,59	6,29
	HT	4,95 <sup>A,B,z,I</sup> ±0,872	4,32;5,59	3,57	5,10	6,41	HT	HT	4,21 <sup>A,B,z,I</sup> ±0,679	3,71;4,70	3,13	4,21	5,51
Transluzenzänderung Warm+							Farbänderung ΔE Warm+						
Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max	Ker	TS	MW±SD	95%KI	Min	Med	Max
IL	LT	4,18 <sup>b,z,I</sup> ±0,968	3,49;4,88	3,07	4,03	6,14	IL	LT	5,64 <sup>b,c,z,I</sup> ±1,63	4,46;6,81	3,70	5,70	8,41
	HT	4,28 <sup>A,B,z,I</sup> ±1,84	2,95;5,61	1,55	4,34	7,33	HT	HT	4,67 <sup>A,z,I</sup> ±1,91	3,28;6,04	2,30	3,84	7,49
EM	LT	2,01 <sup>a,I</sup> ±0,932	1,34;2,69	0,330	2,18	3,27	EM	LT	3,57 <sup>a,I</sup> ±0,887	2,92;4,21	2,20	3,76	4,76
AM	LT	6,40 <sup>c,y,I</sup> ±2,19	4,82;7,97	1,72	6,01	9,02	AM	LT	5,74 <sup>b,c,y,I</sup> ±1,58	4,59;6,88	2,88	5,85	8,71
	HT	3,93 <sup>A,B,z,I</sup> ±1,57	2,80;5,06	0,46	4,26	5,75	HT	HT	4,40 <sup>A,z,I</sup> ±0,767	3,84;4,95	3,55	4,31	5,85
CD	LT	1,35 <sup>a,z,I</sup> ±1,12	0,520;2,19	0,46	1,02	4,16	CD	LT	4,01 <sup>a,b,z,I</sup> ±1,17	3,23;4,10	2,37	3,90	5,63
	HT	2,93 <sup>A,y,I</sup> ±1,09	2,14;3,72	1,65	2,68	4,59	HT	HT	5,03 <sup>A,z,I</sup> ±1,05	4,27;5,79	3,66	4,85	6,46
IC	LT	4,96 <sup>b,c,z,I</sup> ±1,27	4,04;5,88	3,20	4,87	6,74	IC	LT	6,90 <sup>c,y,I</sup> ±1,56	5,77;8,00	4,58	6,43	9,28
	HT	5,59 <sup>B,z,I</sup> ±0,630	5,13;6,05	4,36	5,45	6,54	HT	HT	5,63 <sup>A,z,I</sup> ±0,546	5,23;6,19	4,43	5,79	6,31
NC	LT	6,05 <sup>b,c,y,I</sup> ±0,844	5,44;6,67	4,62	6,26	7,13	NC	LT	7,44 <sup>c,y,I</sup> ±0,939	6,76;8,12	5,96	7,67	8,47
	HT	3,68 <sup>A,z,I</sup> ±1,15	2,85;4,51	1,29	3,78	5,55	HT	HT	5,83 <sup>A,z,I</sup> ±0,958	5,13;6,52	4,39	5,89	7,70

Gruppen gleicher Buchstaben liegen im gleichen Wertebereich. Dabei sind Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe LT (Light+: abc, Warm+: abc) mit kleinen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Keramik innerhalb der Transluzenzstufe HT (Light+: ABC, Warm+: ABC) mit großen Buchstaben, Unterschiede in Bezug auf die Transluzenzstufe (Light+: zy, Warm+: zy) und Unterschiede in Bezug auf das Befestigungskomposit (LT Light+/Warm+: I II III, HT Light+/Warm+: I II III) mit römischen Zahlen dargestellt.

## 8 Diskussion

### 8.1 Studiendesign 1: Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermaler Alterung

Die Nullhypothesen, dass die Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, die Transluzenzstufe der Blöcke und das Alterungslevel keinen Einfluss auf Martenshärte, elastischen Eindringmodul, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul, charakteristische Festigkeit, Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe und Farbänderung zeigen, konnten abgelehnt werden.

Celtra Duo, Amber Mill, IPS e.max CAD und n!ce zeigten insgesamt die höchsten Werte für die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul, während Initial LRF Block und IPS Empress CAD die geringsten Werte aufwiesen. Die beobachteten Ergebnisse lassen sich durch Unterschiede in der Zusammensetzung der Keramiken erklären. Bei Initial LRF Block und IPS Empress CAD handelt es sich jeweils um leuzitbasierte Silikatkeramiken. Diese weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung geringere Festigkeits- und Härteparameter auf als z. B. Lithiumsilikatkeramiken. Die Kristallstruktur leuzitbasierter Silikatkeramiken unterscheidet sich insofern von der Gefügestruktur der Lithiumsilikatkeramiken, dass die in der Glasmatrix enthaltenen Kristalle mit einer mittleren Korngröße von 1-5  $\mu\text{m}$  kleiner sind als die in Lithiumsilikatkeramiken enthaltenen Kristalle (3-6  $\mu\text{m}$ ). Außerdem weisen leuzitbasierte Silikatkeramiken aufgrund eines niedrigeren Kristallgehalts geringere Festigkeitswerte auf, als Lithiumsilikatkeramiken, worauf in einem späteren Abschnitt näher eingegangen wird [14, 16-19, 86]. Möglicherweise kann die Messpyramide zur Ermittlung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls tiefer in leuzitbasierte Silikatkeramiken eindringen, da kleinere Kristalle weniger Widerstand leisten als größere Kristalle. In einer aktuellen Untersuchung wurde die Martenshärte verschiedener Presskeramiken untersucht, wobei auch hier signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Materialien beobachtet werden konnten [87].

Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Amber Mill und n!ce höhere Werte für die Martenshärte und den elastischen Eindringmodul als die Transluzenzstufe HT. Möglicherweise liegt dieser Beobachtung eine unterschiedliche Gefügestruktur der verschiedenen Transluzenzstufen zugrunde. Seitens der Hersteller wird in der Regel jedoch eine standardisierte Zusammensetzung für alle Farbtöne und Transluzenzstufen angegeben, weshalb

die Vermutung nach Unterschieden im Gefüge nicht endgültig bestätigt werden kann. Amber Mill stellt in dieser Hinsicht einen Sonderfall dar, da die Transluzenzstufe bei dieser Silikatkeramik durch individuelles Einstellen der Brenntemperatur im Kristallisationsofen festgelegt wird. Je nach gewünschter Transluzenzstufe werden identisch vorbehandelte, vorkristallisierte Prüfkörper entsprechend eines genauen Protokolls finalisiert und anschließend poliert.

Nach der hydrothermalen Alterung konnte bei Initial LRF Block, Amber Mill (nur EIT) und Celtra Duo eine Verringerung der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls beobachtet werden. Hier zeigen sich bereits erste Hinweise auf eine mögliche Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen durch die Alterung in einem Autoklaven. Bei den genannten Keramiken handelt es sich um eine leuzitbasierte Silikatkeramik, eine Lithiumdisilikatkeramik und um eine Lithiummetasilikatkeramik. So zeigen sich hier zwar Unterschiede in der Zusammensetzung, jedoch beinhalten alle drei Keramiken eine Glasphase, welche somit eine mögliche Ursache der verringerten Werte nach hydrothormaler Alterung darstellen könnte. Möglicherweise ist es durch die gleichzeitige Einwirkung von Druck (2 bar) und Temperatur (134°) zu einer Veränderung der Gefügestruktur der Glasmatrix zulasten der mechanischen Eigenschaften gekommen.

Sowohl vor als auch nach der hydrothermalen Alterung lassen sich Tendenzen beobachten, die sich analog zu den Ergebnissen der Härteprüfung auf die Zusammensetzung der Keramiken zurückführen lassen. IPS e.max CAD und Amber Mill zeigten die mitunter höchsten und Initial LRF Block und IPS Empress CAD die niedrigsten Festigkeitswerte. Während IPS e.max CAD und Amber Mill Lithiumdisilikatkeramiken darstellen, die bekanntermaßen zu den Silikatkeramiken mit den höchsten Festigkeitswerten bis zu 400 MPa zählen, gehören Initial LRF Block und IPS Empress CAD zu den leuzitbasierten Silikatkeramiken mit geringeren Festigkeitswerten im Bereich von 85-120 MPa [14, 16-19]. Celtra Duo und n!ce zählten jedoch teilweise ebenfalls zur Gruppe mit den geringsten Festigkeitswerten. Hier kann erwogen werden ob Faktoren wie eine geringen Stichprobengröße oder die für keramische Werkstoffe typische Sprödigkeit ursächlich gewesen sein könnten.

Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten für Initial LRF Block und Celtra Duo höhere Festigkeitswerte als Blöcke der Transluzenzstufe HT. Ähnliches konnte bereits hinsichtlich der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls beobachtet werden, was die Vermutung nach einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Transluzenzstufen unterstreicht. Genauere Angaben zu den Unterschieden können an dieser Stelle leider nicht aufgeführt werden.

Interessanterweise führte die hydrothermale Alterung für Initial LRF Block, IPS Empress CAD und Celtra Duo zu signifikant erhöhten Biegefestigkeitswerten gegenüber der initialen Prüfung. Auch für die verbleibenden Keramiken konnten in der deskriptiven Statistik nicht durchweg signifikant erhöhte, aber mehrheitlich erhöhte Werte nach hydrothermalen Alterung beobachtet werden. Ähnlich verhielt es sich mit der charakteristischen Festigkeit, wobei hier zusätzlich Amber Mill signifikant höhere Werte nach der hydrothermalen Alterung zeigte. In der Literatur finden sich nur wenige Angaben zur Beeinflussung der Festigkeitswerte silikatkeramischer Werkstoffe durch hydrothermale Alterung in einem Autoklaven. Allerdings konnte für den Werkstoff Zirkonoxid eine Verringerung der Festigkeitswerte nach hydrothermalen Alterung gezeigt werden [68, 69]. Zwei weitere Untersuchungen konnten zeigen, dass die hydrothermale Alterung keinen Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit von IPS e.max CAD zeigte, während ein Einfluss auf Zirkonoxid, CAD/CAM Komposite und ein Hybridmaterial beobachtet werden konnte [72, 73]. In einer weiteren Untersuchung konnte bei identischer Alterungsmethode wie in der vorliegenden Untersuchung kein Einfluss auf die biaxiale Biegefestigkeit von IPS e.max Press (Ivoclar Vivadent) gezeigt werden [74]. Die Vergleichbarkeit zu der vorliegenden Untersuchung ist jedoch limitiert, da sich die Kristalle von IPS e.max Press und IPS e.max CAD insofern unterscheiden, als dass die Kristalle von IPS e.max Press größer und länger sind als die in IPS e.max CAD enthaltenen Kristalle [88]. An dieser Stelle müssen mögliche zugrundeliegende Mechanismen diskutiert werden, die zu den beobachteten Ergebnissen geführt haben können. Die Ergebnisse erlauben die Vermutung, dass die gleichzeitige Einwirkung von Druck (2 bar) und Temperatur (134°C) zu einer Veränderung des Gefüges der Keramiken geführt haben könnte. Möglicherweise ist es in diesem Zusammenhang zu einer Verdichtung des Gefüges gekommen. Hinsichtlich der Anwendung der hydrothermalen Alterung finden sich in der Literatur verschiedene Angaben des verwendeten Druckes (0,2-0,23 MPa) und der Dauer der Alterung (2-160 h) [74, 89-93]. Die vorliegende Untersuchung liegt innerhalb des genannten Bereichs. Insgesamt sind zur Beurteilung des Einflusses hydrothermalen Alterung auf die Festigkeit silikatkeramischer Werkstoffe jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Initial LRF Block zeigte je nach Transluzenzstufe und Prüfungszeitpunkt gemeinsam mit IPS e.max CAD, Celtra Duo, n!ce und IPS Empress CAD die höchsten Werte für den Zuverlässigkeitsparameter Weibull Modul. Die Höhe des Weibull Moduls ist ein Maß für die Zuverlässigkeit bzw. die Ausfallhäufigkeit eines Werkstoffs [41, 42]. Dabei spielen Faktoren wie Gefüge, Herstellung und Verarbeitung eine wesentliche Rolle. Die hohen Werte der



genannten Silikatkeramiken geben Hinweise auf eine vorteilhafte, insbesondere homogene Struktur des Gefüges. Sowohl Silikatkeramiken aus der Gruppe der leuzitbasierten Silikatkeramiken als auch Silikatkeramiken aus der Gruppe der Lithiumsilikatkeramiken gehörten hier zur Gruppe mit den höchsten Werten. Diese Beobachtung zeigt eine wichtige Eigenschaft des Weibull Moduls auf: Er ist unabhängig von der Festigkeit eines Werkstoffs [41, 42]. Das heißt, dass ein Werkstoff mit einer geringen Festigkeit wie z. B. Initial LRF Block trotzdem einen hohen Weibull Modul aufweisen kann, da dieser lediglich angibt, dass ein Werkstoff häufiger bei gleicher Belastung frakturiert als ein Werkstoff mit einem niedrigen Weibull Modul.

Blöcke der Transluzenzstufe LT zeigten auch hinsichtlich des Weibull Moduls für die Silikatkeramik n!ce höhere Werte als Blöcke der Transluzenzstufe HT, was die beschriebenen Beobachtungen hinsichtlich der Martenshärte, des elastischen Eindringmoduls und der Biegefestigkeit weiter bestärkt.

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten IPS e.max CAD LT und n!ce LT einen niedrigeren Weibull Modul. Die CAD/CAM-Silikatkeramiken waren also nach der hydrothermalen Alterung nicht mehr so zuverlässig wie vorher. Dies gibt Hinweise auf eine negative Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch die hydrothermale Alterung, die hinsichtlich der biaxialen Biegefestigkeit nicht beobachtet werden konnte.

Jede der untersuchten Silikatkeramiken lag mit dem initialen Farbwert E Lab initial in einem eigenen Wertebereich. Diese Beobachtung zeigt, dass die identisch bezeichnete Farbe A2 zwischen verschiedenen Herstellern abweicht. Dies konnte sowohl für die Transluzenzstufe LT als auch für die Transluzenzstufe HT beobachtet werden. Auch in der Literatur ist beschrieben, dass zwischen verschiedenen Herstellern teilweise signifikante Unterschiede bei identisch bezeichneten Farbtönen bestehen [53]. Die beobachteten Ergebnisse müssen bei der Farbwahl im klinischen Alltag, insbesondere beim Vergleich silikatkeramischer Werkstoffe von verschiedenen Anbietern, berücksichtigt werden.

Der L-Wert macht Angaben über die Helligkeit oder Luminanz eines Werkstoffs und wird mit Werten von 0 bis 100 angegeben, wobei höhere Werte eine höhere Helligkeit anzeigen. Dies geht mit den beobachteten Ergebnissen einher, dass L-Wert und Transluzenz positiv miteinander korrelieren.

Beim Vergleich der Silikatkeramiken untereinander zeigten Amber Mill und Initial LRF Block die höchsten Transluzenz- und L-Werte, während IPS e.max CAD und n!ce mitunter die geringsten Werte aufwiesen. Dies stützt die bereits erwähnte Beobachtung, dass identisch

angegebene Farb- und Transluzenztöne zwischen unterschiedlichen Herstellern differieren können.

Blöcke der Transluzenzstufe HT zeigten bis auf eine Ausnahme – Amber Mill – höhere Transluzenz- und L-Werte als Blöcke der Transluzenzstufe LT. Dies geht mit den Bezeichnungen LT für low translucency (Englisch für ‚niedrige Transluzenz‘) und HT für high translucency (Englisch für ‚hohe Transluzenz‘) einher. Für Amber Mill konnte kein Unterschied zwischen den untersuchten Transluzenzstufen festgestellt werden. Amber Mill hat wie oben beschrieben ein abweichendes Verarbeitungsprotokoll, welches durch das individuelle Einstellen der Brenntemperatur am Kristallisationsofen zur gewünschten Transluzenzstufe führen soll. Die beobachteten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Festlegung der Transluzenzstufe durch ein solches Verfahren möglicherweise zu ungenau ist und für gezielte Einstellung der Transluzenz eventuell eher eine veränderte Zusammensetzung eine Rolle spielen könnte.

Nach der hydrothermalen Alterung kam es bei den untersuchten Silikatkeramiken zu einer Verringerung sowohl des L-Werts als auch der Transluzenz. Die Silikatkeramiken waren nach der hydrothermalen Alterung also dunkler und weniger lichtdurchlässig, was auf die Erhitzung (134°) unter Druck (2 bar) zurückzuführen sein könnte. Die hydrothermale Alterung zeigte hier also einen signifikanten Einfluss auf die optischen Eigenschaften.

Celtra Duo zeigte die größte Transluzenz- bzw. Farbänderung. Gründe hierfür können im Bereich der lichtoptischen Eigenschaften oder ihrer Zusammensetzung liegen. Celtra Duo besteht zu 58% aus Siliziumdioxid, zu 18,5% aus Lithiumoxid, zu 10,1% aus Zirkonoxid und zu 13,4% aus anderen Inhaltsstoffen. Da Zirkonoxid im Allgemeinen schlechtere optische Eigenschaften wie z. B. eine geringere Transluzenz aufweist, könnten die Ergebnisse in diesem Zusammenhang erklärt werden. Ein Einfluss hydrothermalen Alterung hinsichtlich der optischen Eigenschaften konnte für Zirkonoxid wie auch für Lithiumdisilikatkeramik gezeigt werden [74, 94].

## 8.2 Studiendesign 2: Biegefestigkeit von CAD/CAM-Silikatkeramiken

Die Nullhypothese, dass kein Unterschied zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die nach 100 h hydrothermaler Alterung gemessen wurden, konnte abgelehnt werden. Ebenso konnte die Nullhypothese abgelehnt werden, die besagt, dass zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen wurden und zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen wurden, kein Unterschied besteht.

Nach der hydrothermalen Alterung konnten bei einigen der untersuchten Silikatkeramiken signifikant erhöhte biaxiale Biegefestigkeitswerte beobachtet werden. Die möglichen zugrundeliegenden Mechanismen wurden bereits in Kapitel 8.1 diskutiert.

Das Aufbringen des konventionellen Befestigungskomposits in der Farbe Light+ führte bei der Silikatkeramik Amber Mill zu einer signifikanten Steigerung der Biegefestigkeitswerte. Diese Beobachtung unterstreicht die gängige Auffassung, dass Lithiumdisilikatkeramiken adhäsiv befestigt werden sollten, da die adhäsive Befestigung zu einer Erhöhung der Gesamtstabilität der Restauration beitragen kann [15, 56, 57]. Jedoch wurden für die verbleibenden Silikatkeramiken mitunter signifikant höhere Werte bei initialer Prüfung ermittelt als nach Aufbringen des Befestigungskomposits, was die Relevanz genannten Ergebnisse bei Amber Mill schmälert.

Hinsichtlich Amber Mill konnte außerdem ein Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits beobachtet werden, da die Farbe Warm+ zu höheren Biegefestigkeitswerten führte als die Farbe Light+. Zwar werden seitens des Herstellers identische Inhaltsstoffe der beiden Farben Light+ und Warm+ angegeben, die genannte Beobachtung lässt jedoch darauf schließen, dass die gewählten Farben in unterschiedlicher Weise Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften nehmen.

Nach der hydrothermalen Alterung zeigten IPS e.max CAD und n!ce einen niedrigeren Weibull Modul als bei initialer Prüfung. Die CAD/CAM-Silikatkeramiken waren also nach der hydrothermalen Alterung nicht mehr so zuverlässig wie vorher. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Prüfung der biaxialen Biegefestigkeit bestehen hier Hinweise auf eine negative Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften im Sinne einer verringerten Zuverlässigkeit der Silikatkeramiken. Ein verringerter Weibull Modul beschreibt eine geringere Zuverlässigkeit der Messwerte eines Werkstoffs. Anders ausgedrückt kann es durch die hydrothermale Alterung zu

einer nachteiligen Veränderung des Gefüges gekommen sein. Das Ergebnis ist dann, dass die Silikatkeramik eine höhere Streuung in den Festigkeitswerten aufweist.

Ebenso wie bei der biaxialen Biegefestigkeit beeinflussten die Farben des Befestigungskomposits die Zuverlässigkeit der Silikatkeramiken in unterschiedlicher Weise. Hinsichtlich der Farbe Light+ konnten keine Unterschiede zwischen initialer Messung und Messung nach Aufbringen des Befestigungskomposits ermittelt werden. Die Farbe Warm+ hingegen führte bei Amber Mill und IPS e.max CAD zu signifikant höheren Zuverlässigkeitswerten im Vergleich zur initialen Prüfung. Anknüpfend an die Beobachtungen bei der biaxialen Biegefestigkeit zeigen sich hier Tendenzen in Richtung verbesserter mechanischer Eigenschaften durch das Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits, was die adhäsive Befestigung als geeignete Methode bei der Anwendung silikatkeramischer Restaurationen unterstützt.

Die Diskussion der Ergebnisse der Messung der charakteristischen Festigkeit ist Kapitel 8.1 zu entnehmen.

### **8.3 Studiendesign 3: Der Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken**

Die Nullhypothesen, dass die Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, die Transluzenzstufe der Blöcke und die Farbe des Befestigungskomposits keinen Einfluss auf Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe, Farbänderung, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul und charakteristische Festigkeit zeigen, konnten abgelehnt werden.

Hinsichtlich der biaxialen Biegefestigkeit, des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit wird auf Kapitel 8.2 verwiesen.

Es konnte eine positive Korrelation zwischen der Transluzenz und dem L-Wert beobachtet werden. Zugrundeliegende Mechanismen werden in 8.1 diskutiert. Hinsichtlich des Einflusses des Befestigungskomposits konnte sowohl für die Transluzenz als auch für den L-Wert ein signifikanter Effekt beobachtet werden. Beim Vergleich initial gemessener Gruppen mit Gruppen, die mit Befestigungskomposit versehen worden waren, konnten für letztere durchweg niedrigere Transluzenz- und L-Werte ermittelt werden. Eine Beeinflussung optischer Eigenschaften durch ein konventionelles Befestigungskomposit ist also generell möglich.

Beim Vergleich der Farben Light+ und Warm+ des verwendeten Befestigungskomposits Variolink Esthetic DC, zeigten mit der Farbe Warm+ versehene Prüfkörper signifikant höhere Transluzenz- und L-Werte, als mit der Farbe Light+ versehene Prüfkörper. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass unterschiedliche Farbe eines konventionellen Befestigungskomposits die optischen Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen in unterschiedlicher Weise beeinflussen können. Auf diese Beobachtung wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Hinsichtlich der Transluzenz- und Farbänderung konnte gezeigt werden, dass die Farbe Light+ einen größeren Einfluss auf die Transluzenzänderung und die Farbe Warm+ von Variolink Esthetic DC einen größeren Einfluss auf die Farbänderung zeigte. Dies geht mit den Herstellerangaben einher, laut derer die Farbe Warm+ eine Transluzenz von etwa 8,5% und die Farbe Light+ eine Transluzenz von etwa 5% aufweist [95]. Die Zusammensetzung der beiden Farben ist bis auf die zugefügten Pigmente identisch. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Farbbezeichnungen des Befestigungskomposits sich auf die fertiggestellte Restauration beziehen und nicht allein auf die Farbe des Befestigungskomposits. Dies muss bei

der Auswahl einer Farbe berücksichtigt werden. Außerdem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass mathematisch ermittelte Farbunterschiede nicht zwingend mit bloßem Auge erkennbar sind. Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Farbunterschiede erstrecken sich zwischen 2,5 und 6,7. Werte für die Farbänderung  $\Delta E < 3,3$  sind für das menschliche Auge nur schwer erkennbar [96]. Weiterhin sind geringe Farbunterschiede oft nur für ein geschultes Auge sichtbar und außerdem abhängig von Faktoren wie dem Umgebungslicht. Deshalb muss die Relevanz der Farbänderung in einigen der beobachteten Fälle kritisch hinterfragt werden. Trotzdem kann festgehalten werden, dass eine Beeinflussung der optischen und damit auch der ästhetischen Eigenschaften silikatkeramischer Restaurationen durch die Farbe des Befestigungskomposits gezeigt werden konnte. Dies könnte im klinischen Alltag zur Optimierung der Ästhetik von Restaurationen genutzt werden. Die Studienlage hierzu ist insgesamt kontrovers, da die durchgeführten Untersuchungen zu verschiedenen Ergebnissen bezüglich des Einflusses der Farbe des Befestigungskomposits kommen [77, 82, 97-99]. Während einige Studien keinen Einfluss des Befestigungskomposits auf die Ästhetik der Restaurationen ermitteln konnten [76, 77], konnte in weiteren Untersuchungen ein Einfluss sowohl des Befestigungskomposits als auch der Schichtstärke der Restauration beobachtet werden [78, 81, 82, 100]. Die Vergleichbarkeit der Untersuchungen wird durch unterschiedliche Studiendesigns und Schwerpunkte erschwert. Es sind also weitere Untersuchungen notwendig, um die Beobachtungen zu bestätigen.

Hinsichtlich der Anwendung im klinischen Alltag darf auch der Einfluss der Hintergrundfarbe, also der Stumpffarbe, nicht vernachlässigt werden. Da sich die vorliegenden Untersuchungen vornehmlich mit dem selektiven Einfluss hydrothermalen Alterungs und dem Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits befassen, wurde der Einfluss der Hintergrundfarbe hier außer Acht gelassen. Im klinischen Alltag besteht jedoch häufig die Notwendigkeit, eine dunkle Stumpffarbe zu maskieren. Diverse Untersuchungen zeigen, dass die Stumpffarbe die Gesamtfarbe und -erscheinung einer Restauration maßgeblich beeinflussen kann [77, 78, 97, 101, 102]. Wie bereits in der Literaturübersicht erwähnt, wurde im Jahre 2014 eine Untersuchung durchgeführt, die neben dem Einfluss der Farbe des Befestigungskomposits auch den Einfluss der Schichtstärke verschiedener silikatkeramischer Werkstoffe auf die Maskierung eines dunklen Hintergrunds beinhaltete. Die Abdeckung der Hintergrundfarbe konnte hier durch ein Zusammenspiel aus Schichtstärke und Farbe des Befestigungskomposits erzielt werden, was die Bedeutung der Farbe des Befestigungskomposits unterstreicht [78]. Ein Zusammenhang zwischen der Schichtstärke und den Farbunterschieden vor und nach

Aufbringen eines Befestigungskomposits konnte ebenfalls in einer Untersuchung aus dem Jahre 2013 hergestellt werden [80]. Jedoch lag der Schwerpunkt in den genannten Untersuchungen im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung nicht auf der selektiven Analyse der Farbe des Befestigungskomposits, sondern auf der Maskierung eines dunklen Hintergrunds.

Ein weiterer Faktor, der die Ästhetik silikatkeramischer Restaurationen beeinflussen kann, ist die Schichtstärke der Restauration [101, 102]. In der soeben genannten Untersuchung konnte ab einer Schichtstärke von 1 mm eine Maskierung der Hintergrundfarbe erzielt werden. Die Schichtstärke der Prüfkörper der vorliegenden Untersuchungen von  $0,95 \pm 0,03$  mm liegt in einem ähnlichen Bereich und wird dadurch unterstützt. Wie in der Literaturübersicht beschrieben, existiert zu diesem Thema eine weitere Untersuchung, im Rahmen derer zum einen verschiedene Bereiche silikatkeramischer Restaurationen analysiert wurden und zum anderen eine selektive Untersuchung von Prüfkörpern bestehend aus einem konventionellen Befestigungskomposit erfolgte. Jedoch beinhaltete die Untersuchung im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung einen weiteren Aspekt, nämlich die Analyse verschiedener Bereiche der Restaurationen [79]. Durch die Einbeziehung der innerhalb einer Restauration differierenden Schichtstärken sowohl der Keramik als auch des Befestigungskomposits, können möglicherweise unterschiedliche Empfindlichkeiten dieser Bereiche auf eine Beeinflussung durch Faktoren wie das Befestigungskomposit ermittelt werden. Dies könnte relevante Erkenntnisse für die Anwendung im klinischen Alltag liefern. Eine Stärke der beschriebenen Untersuchung liegt demnach in der Verwendung einer Geometrie, wie sie im klinischen Gebrauch Verwendung findet.

Anknüpfend an die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und die Ergebnisse der genannten Untersuchungen könnte die Analyse verschiedener Bereiche einer Restauration sowie die Untersuchung eines selektiven Einflusses von Alterung, Befestigungskomposit, Schichtstärke und Hintergrundfarbe Gegenstand weiterer Forschung zu diesem Thema sein [79]. Eine optimale Abstimmung der genannten Faktoren aufeinander kann zu ästhetisch ansprechenden Ergebnissen führen.

Die Transluzenz- und Farbmessungen wurden mit einem Spektrophotometer (Lambda 35) durchgeführt. Mithilfe einer speziell angefertigten Vorrichtung konnten die scheibenförmigen Prüfkörper im Gerät platziert werden. Bei dem verwendeten Spektrophotometer handelt es sich um ein empfindliches Gerät, welches bereits auf geringste Ungenauigkeiten reagiert. Kleinste Staub- oder Schmutzpartikel im Innenraum des Spektrophotometers können durch Beeinträchtigung der Funktion der Ulbrichtkugel zu Abweichungen der Messwerte führen.

Deshalb sollte neben einer akkuraten Positionierung der Prüfkörper bei Verwendung dieses Geräts auch auf eine exakte Arbeitsweise geachtet werden. Hier kann unter anderem die Prüfkörperanzahl genutzt werden, um dem Problem der Abweichung und damit der Streuung von Messwerten entgegenzuwirken. Auf den Zusammenhang zwischen Prüfkörperanzahl und Streuung von Messwerten wird in einem späteren Abschnitt genauer eingegangen. Vorteil des verwendeten Spektrophotometers ist hingegen die Bestimmung der Farbwerte (Lab), die einem universell einsetzbaren und international verwendeten Farbsystem angehören [50]. Für die klinische Anwendung kann das CIELAB-System ein Hindernis darstellen, da die Werte nicht ohne das Hinzuziehen einer Farbskala interpretiert werden können. Im Alltag wird hier nach wie vor auf die Farbbezeichnungen der Hersteller zurückgegriffen. Jedoch bestehen zwischen den einzelnen Herstellern Abweichungen in den Transluzenz- und Farbwerten identisch bezeichneter Materialien [79]. Eine Standardisierung der Farbbezeichnungen z. B. basierend auf dem CIELAB-System wäre hier wünschenswert. Basierend auf  $L^*a^*b^*$ -Farbwerten wurde die aktuellere CIE 2000 Formel zur Ermittlung von Farbunterschieden entwickelt. Durch Modifikation der ursprünglichen  $L^*a^*b^*$ -Formel ist es damit möglich, Farbunterschiede noch präziser zu ermitteln [55]. Die standardisierte Anwendung solcher normierter Farbschemata würde eine herstellerunabhängige Vergleichbarkeit von Farben, Farbtönen und Transluzenzstufen ermöglichen und die Anwendung im klinischen Alltag deutlich erleichtern.



## 8.4 Limitierungen

Die Bildung von Untergruppen resultierte in relativ kleinen Stichprobengrößen ( $n=10$ ). Dies stellt eine Limitierung der durchgeführten Untersuchungen dar. Generell lässt sich sagen, dass kleinere Stichproben weniger gut dazu geeignet sind, die Grundgesamtheit eines Kollektivs, also z. B. eines Werkstoffs zu repräsentieren. Außerdem besteht bei kleineren Stichproben das Problem, dass signifikante Unterschiede möglicherweise nicht entdeckt werden, wo hingegen es bei größeren Stichproben zu einer Überinterpretierung signifikanter Werte kommen kann. Kommt es im Rahmen von Versuchsdurchführungen zu Streuungen, könnten diese in kleineren Stichproben weniger gut ausgeglichen werden als in größeren Stichproben, was letztlich zu einer Verfälschung von Messwerten führen kann.

Eine weitere Limitierung der vorliegenden Untersuchung besteht darin, dass der Einfluss der hydrothermalen Alterung und der Einfluss des Befestigungskomposits auf die verwendeten Silikatkeramiken getrennt voneinander erhoben wurde, weil eine hydrothermale Alterung des Befestigungskomposits in einem Autoklaven nicht möglich war. Dies stellt einen kritischen Punkt der vorliegenden Arbeit dar, da dies nicht der klinischen Realität entspricht. Hinsichtlich der Farbstabilität von Variolink Esthetic wird zwar angegeben, dass diese zum einen durch veränderte Initiatoren (Photoinitiator Ivocerin) unter Verzicht auf die hauptsächlich für Verfärbungen verantwortlichen Amine gewährleistet wird [103]. Zum anderen zeigten Verfärbungstests durchgeführt nach der Prüfnorm DIN EN ISO 4049 [85] sowie eine achtwöchige Lagerung in Wasser keine signifikanten Farbänderungen des Befestigungskomposits [95]. Jedoch erlauben diese Angaben dies keine Beurteilung der Farbstabilität von Variolink Esthetic nach hydrothormaler Alterung, bei der zu einer Erhitzung ( $134^{\circ}\text{C}$ ) unter Druck (2 bar) kommt. Hierzu liegen in der Literatur keine Angaben vor.

Hinsichtlich des Befestigungskomposits stellt eine weitere Limitierung die Tatsache dar, dass nur ein Befestigungskomposit eines Herstellers untersucht wurde. Es können so keine Aussagen über Vergleiche zwischen verschiedenen Befestigungskompositen getroffen werden. Insbesondere kann kein Vergleich zwischen identisch angegebenen Farben der Befestigungskomposite verschiedener Hersteller durchgeführt werden. An dieser Stelle muss ebenfalls diskutiert werden, ob das manuelle Auftragen des Befestigungskomposits zu Messungenauigkeiten geführt haben könnte.

Zuletzt muss als eine allgemeine Limitierung von in-vitro durchgeführten Untersuchungen erwähnt werden, dass ihre Ergebnisse nicht exakt auf die klinische Situation übertragbar sind. Scheibenförmige Prüfkörper spiegeln nicht die Geometrie wider, die im klinischen Alltag Verwendung findet. Es sind hierzu weitere Untersuchungen notwendig, die eine klinische Geometrie, wie sie bei silikatkeramischen Restaurationen vorzufinden ist, beinhalten. Aufgrund der innerhalb einer Restauration variierenden Schichtstärke und damit auch einer variierenden Stärke des Befestigungskomposits können hier möglicherweise Unterschiede hinsichtlich der optischen wie auch der mechanischen Eigenschaften zu beobachten sein.

## 9 Schlussfolgerung

Seitens des Patienten wächst die Nachfrage nach gleichermaßen nachhaltigen und ästhetischen Restaurationen, die dem Aussehen natürlicher Zähne nahekommen. Silikatkeramische Restaurationen stellen hier in vielen Fällen das Mittel der Wahl dar, wenn es darum geht, sowohl optisch als auch funktionell zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen – insbesondere im ästhetisch anspruchsvollen Frontzahnbereich. Deshalb stellten CAD/CAM-Silikatkeramiken und ihre Eigenschaften den zentralen Gegenstand der vorliegenden Dissertation dar.

Studiendesign 1 beschäftigte sich mit den mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothormaler Alterung. Zum einen konnten vergleichbare mechanische Eigenschaften innerhalb der gebildeten Materialgruppen Leuzit- und Lithiumsilikatkeramik beobachtet werden. Zum anderen beeinflusste die hydrothermale Alterung die mechanischen Eigenschaften in unterschiedlichem Maße. Während sich hinsichtlich der Martenshärte und des elastischen Eindringmoduls teilweise eine Verringerung der Werte zeigte, konnten bei der biaxialen Biegefestigkeit und der charakteristischen Festigkeit höhere Werte nach hydrothormaler Alterung beobachtet werden. Die Erhebung des initialen Farbwerts zeigte die schwierige Vergleichbarkeit von Silikatkeramiken unterschiedlicher Hersteller auf. Weiterhin konnte eine positive Korrelation zwischen der Transluzenz und dem L-Wert beobachtet werden. Auch hinsichtlich der Transluzenz, des L-Werts, der Transluzenz- und Farbänderung zeigten sich mitunter signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Silikatkeramiken.

Im Rahmen des Studiendesign 2 wurden mechanische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken untersucht, wobei Unterschiede zwischen initial gemessenen und gealterten sowie zwischen initial gemessenen und mit Befestigungskomposit versehenen Prüfkörpern untersucht wurden. Hinsichtlich der biaxialen Biegefestigkeit und der charakteristischen Festigkeit konnten höhere Werte nach hydrothormaler Alterung beobachtet werden. Beim Vergleich initial gemessener Prüfkörper mit Prüfkörpern, die mit Befestigungskomposit versehen worden waren, konnten für Amber Mill höhere Festigkeitswerte mit Befestigungskomposit ermittelt werden, wobei für die verbleibenden Silikatkeramiken höhere Werte bei initialer Prüfung beobachtet wurden. Der Weibull Modul war nach hydrothormaler Alterung mitunter geringer als bei initialer Prüfung, während bei Prüfkörpern mit

Befestigungskomposit höhere Werte nach Aufbringen des Befestigungskomposits beobachtet werden konnten.

In Studiendesign 3 wurde der Schwerpunkt auf die Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken durch ein konventionelles Befestigungskomposit gelegt. Die Ergebnisse der mechanischen Parameter konnten wie im Studiendesign 1 auf die Zusammensetzung der Silikatkeramiken zurückgeführt werden. In Bezug auf die optischen Eigenschaften konnte hier ebenfalls eine positive Korrelation zwischen der Transluzenz und dem L-Wert beobachtet werden. Außerdem führte das Aufbringen des Befestigungskomposits zu signifikant verringerten Transluzenz- und L-Werten. Die Farbe Warm+ des Befestigungskomposits führte zu höheren Transluzenz- und L-Werten als die Farbe Light+. Weiterhin führte die Farbe Light+ zu einer größeren Transluzenzänderung und die Farbe Warm+ zu einer größeren Farbänderung.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass die mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken durch die hydrothermale Alterung beeinflusst werden können. Außerdem differieren die genannten Eigenschaften zwischen Materialien gleicher Zusammensetzung je nach Hersteller. Auch das Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits zeigt einen Einfluss auf mechanische und optische Eigenschaften und rechtfertigt so seinen Einsatzbereich bei der adhäsiven Befestigung silikatkeramischer Restaurationen. Außerdem zeigt die Beeinflussung der optischen Eigenschaften durch das Befestigungskomposit Möglichkeiten auf, die Ästhetik silikatkeramischer Restaurationen durch korrekten Einsatz zu optimieren und damit zu einem verbesserten Gesamtergebnis beizutragen.

Die Studienlage zu den untersuchten Fragestellungen ist noch nicht ausreichend, weshalb weitere Untersuchungen notwendig sind, um die beobachteten Ergebnisse und Tendenzen zu bestätigen. Verwendete Studiendesigns sollten die verschiedenen Einflussfaktoren wie Alterung, Befestigungskomposit, Hintergrundfarbe und Schichtstärke miteinbeziehen. Allerdings sollte neben eventuellen Interaktionen auch eine selektive Beurteilung der einzelnen Einflussfaktoren möglich sein. Ein weiterer Aspekt, der in nachfolgenden Untersuchungen Bedeutung finden könnte, ist neben der Verwendung einer dreidimensionalen Geometrie auch die Beurteilung verschiedener Bereiche einer Restauration.

## 10 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigte sich mit den mechanischen und optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken sowie mit dem Einfluss hydrothermaler Alterung und dem Einfluss eines konventionellen Befestigungskomposits auf die genannten Eigenschaften.

Es wurden für die verschiedenen Studiendesigns Prüfkörper der folgenden sechs CAD/CAM-Silikatkeramiken des Farbtons A2 in den Transluzenzstufen LT und HT hergestellt: Initial LRF Block, IPS Empress CAD (nur LT), IPS e.max CAD, Amber Mill, n!ce und Celtra Duo. Für das Studiendesign 1 (N=220; n=10) wurde ein Teil der Prüfkörper (N=110; n=10) hinsichtlich der Martenshärte, des elastischen Eindringmoduls, der biaxialen Biegefestigkeit, des Weibull Moduls und der charakteristischen Festigkeit initial geprüft. Ein weiterer Teil der Prüfkörper (N=110; n=10) wurde nach initialer Transluzenz- und Farbmessung der hydrothermalen Alterung (100 h) zugeführt. Anschließend wurden erneut die Transluzenz und die Farbe sowie die Martenshärte, der elastische Eindringmodul, die biaxiale Biegefestigkeit, der Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit erhoben.

Für das Studiendesign 2 (N=440) wurden die biaxiale Biegefestigkeit, der Weibull Modul und die charakteristische Festigkeit erhoben. Eine Gruppe (N=110; n=10) der Prüfkörper wurde initial geprüft, während eine weitere Gruppe (N=110; n=10) nach hydrothermalen Alterung und eine weitere Gruppe (N=220; n=10) nach dem Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits (Variolink Esthetic DC in den Farben Light+ und Warm+) untersucht wurde.

Im Rahmen des Studiendesign 3 (N=220; n=10) wurden die Prüfkörper nach initialer Transluzenz- und Farbmessung mit dem Befestigungskomposit (Variolink Esthetic DC in den Farben Light+ und Warm+) versehen und anschließend erneut hinsichtlich Transluzenz und Farbe sowie hinsichtlich biaxialer Biegefestigkeit, Weibull Modul und charakteristischer Festigkeit untersucht.

Die statistische Analyse erfolgte mithilfe eines Kolmogorov-Smirnov-Tests. Für die parametrische Auswertung wurden ein T-Test oder eine unifaktorielle Varianzanalyse unter Verwendung eines Post-hoc-Tests nach Scheffé durchgeführt. Für die nicht-parametrische Auswertung wurden der Kruskal-Wallis- und der Mann-Whitney-U-Test unter Verwendung einer Bonferroni-Korrektur hinzugezogen. Die Ermittlung der Weibull Module und der

charakteristischen Festigkeit erfolgte unter Verwendung der Maximalwahrscheinlichkeits-Schätzungsmethode (Maximum-Likelihood-Methode). Alle Tests wurden bei einem Signifikanzniveau  $\alpha=0,05$  durchgeführt.

Innerhalb des Studiendesign 1 konnte ein Einfluss der Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, der Transluzenzstufe der Blöcke und des Alterungslevels auf Martenshärte, elastischen Eindringmodul, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul, charakteristische Festigkeit, Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe und Farbänderung beobachtet werden. Im Rahmen des Studiendesign 2 konnten Unterschiede zwischen initial gemessenen und nach hydrothermaler Alterung gemessenen Prüfkörpern beobachtet werden. Außerdem konnten Unterschiede zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Light+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, sowie zwischen initial gemessenen Prüfkörpern und Prüfkörpern, die mit der Farbe Warm+ des Befestigungskomposits versehen worden waren, ermittelt werden. Die Ergebnisse von Studiendesign 3 zeigten einen Einfluss der Wahl der CAD/CAM-Silikatkeramik, der Transluzenzstufe der Blöcke und der Farbe des Befestigungskomposits auf Transluzenz, Transluzenzänderung, Farbe, Farbänderung, biaxiale Biegefestigkeit, Weibull Modul und charakteristische Festigkeit.

Abschließend kann gefolgert werden, dass die untersuchten CAD/CAM-Silikatkeramiken in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und abweichend je nach Hersteller unterschiedliche mechanische und optische Eigenschaften aufwiesen. Diese Eigenschaften wurden außerdem in unterschiedlichem Maße durch die hydrothermale Alterung sowie durch das Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits beeinflusst.

Es sind an dieser Stelle weitere Untersuchungen notwendig, um die ermittelten Ergebnisse und Tendenzen zu bestätigen. Jedoch kann ein Ausblick darauf gegeben werden, dass eine funktionelle wie auch ästhetische Optimierung silikatkeramischer Restaurationen durch den gezielten Einsatz eines konventionellen Befestigungskomposits möglich ist.

## 11 Literaturverzeichnis

1. Mandl A, Liebermann A and Stawarczyk B. Einfluss der adhäsiven Befestigung auf die Ästhetik von Glaskeramikrestaurationen. ZMK aktuell, 2018. 34(12): p. 856-863.
2. Jordan AR and Micheelis W. Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie-(DMS V). 2016: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV.
3. Micheelis W. Vierte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS IV): Neue Ergebnisse zu oralen Erkrankungsprävalenzen, Risikogruppen und zum zahnärztlichen Versorgungsgrad in Deutschland 2005. 2006: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV.
4. Restorative Dentistry Market Analysis By Product (Restorative Materials, Implants, Prosthetics, Restorative Equipment), By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2025. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/restorative-dentistry-market>.
5. Edelhoff D. Vollkeramische Restaurationen. Der Freie Zahnarzt, 2017. 61(10): p. 84-93.
6. Kern M, Kohal RJ, Mehl A, Pospiech P, Frankenberger R, Reiss B, Wiedhahn K and Kunzelmann KH. Vollkeramik auf einen Blick. Leitfaden zur Indikation, Werkstoffauswahl, Vorbereitung und Eingliederung von vollkeramischen Restaurationen, 2012. 4.
7. D’Arcangelo C, Vanini L, Rondoni GD and De Angelis F. Wear properties of dental ceramics and porcelains compared with human enamel. J Prosthet Dent, 2016. 115(3): p. 350-355.
8. Anusavice KJ. Degradability of dental ceramics. J Dent Res, 1992. 6(1): p. 82-89.
9. Höland W. Biocompatible and bioactive glass-ceramics—state of the art and new directions. J Non-Cryst Solids, 1997. 219: p. 192-197.

10. Pospiech P and Kern M. Verblendet vs. Monolithisch. ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt, 2016. 125(09): p. 430-436.
11. Meyer G, Ahsbahs S and Kern M. S3-Leitlinie „Vollkeramische Kronen und Brücken“. Dtsch Zahnärztl, 2014(2015): p. 70.
12. Villarroel M, Fahl N, De Sousa A and De Oliveira OB. Direct esthetic restorations based on translucency and opacity of composite resins. J Esthet Restor Dent, 2011. 23(2): p. 73-87.
13. Roolf B, Meyer G, Ahsbahs S, Kern M, Ahlers PDDMO, Bartsch K, Beck J, Beuer F, Christelsohn K and Reiss B. Vollkeramische Kronen und Brücken (S3). 2016.
14. Rosentritt M, Kieschnick A, Hahnel S and Stawarczyk B. Werkstoffkunde Kompendium Dentale Keramiken. 2018.
15. Stawarczyk B and Wimmer T. Die Teilkrone - materialwissenschaftliche Aspekte. teamwork J Cont Dent Educ, 2016. 2: p. 128-137.
16. Sack W. Glas, Glaskeramik und Sinterglaskeramik. Chemie Ingenieur Technik, 1965. 37(11): p. 1154-1165.
17. Beall GH. Design and properties of glass-ceramics. Annu Rev Mat Sci, 1992. 22(1): p. 91-119.
18. Seghi RR, Denry IL and Rosenstiel SF. Relative fracture toughness and hardness of new dental ceramics. J Prosthet Dent, 1995. 74(2): p. 145-150.
19. Tinschert J, Zvez D, Marx R and Anusavice KJ. Structural reliability of alumina-, feldspar-, leucite-, mica-and zirconia-based ceramics. Int J Dent, 2000. 28(7): p. 529-535.



20. Guazzato M, Albakry M, Ringer SP and Swain MV. Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part I. Pressable and alumina glass-infiltrated ceramics. *Dent Mat J*, 2004. 20(5): p. 441-448.
21. Wolleb K, Sailer I, Thoma A, Menghini G, Hämmerle F and Christoph H. Clinical and radiographic evaluation of patients receiving both tooth-and implant-supported prosthodontic treatment after 5 years of function. *Int J Prosthodont*, 2012. 25(3).
22. Passia N, Stampf S and Strub JR. Five-year results of a prospective randomised controlled clinical trial of posterior computer-aided design–computer-aided manufacturing ZrSiO<sub>4</sub>-ceramic crowns. *J Oral Rehabil*, 2013. 40(8): p. 609-617.
23. Marquardt P and Strub JR. Survival rates of IPS Empress 2 all-ceramic crowns and fixed partial dentures: Results of a 5-year prospective clinical study. *Quintessence Int*, 2006. 37(4).
24. Steeger B. Survival analysis and clinical follow-up examination of all-ceramic single crowns. *Int J Comput Dent*, 2010. 13(2): p. 101-119.
25. Beier US, Kapferer I and Dumfahrt H. Clinical long-term evaluation and failure characteristics of 1,335 all-ceramic restorations. *Int J Prosthodont*, 2012. 25(1).
26. Fradeani M and Redemagni M. An 11-year clinical evaluation of leucite-reinforced glass-ceramic crowns: A retrospective study. *Quintessence Int*, 2002. 33(7).
27. Valenti M and Valenti A. Retrospective survival analysis of 261 lithium disilicate crowns in a private general practice. *Quintessence Int*, 2009. 40(7).
28. Gehrt M, Wolfart S, Rafai N, Reich S and Edelhoff D. Clinical results of lithium-disilicate crowns after up to 9 years of service. *Clin Oral Investig*, 2013. 17(1): p. 275-284.
29. Heine B. *Werkstoffprüfung. Ermittlung von Werkstoffeigenschaften*, Hanser, 2003.

- 
30. DIN EN ISO 14577-1: 2012-03: Metallische Werkstoffe-Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffe – Parameter-Teil 1: Prüfverfahren, Deutsches Institut für Normung eV, Deutsche Fassung 2012.
  31. Marxkors R, Meiners H and Geis-Gerstorfer J. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. Hanser Köln München: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV, 2008.
  32. Shahdad SA, McCabe JF, Bull S, Rusby S and Wassell RW. Hardness measured with traditional Vickers and Martens hardness methods. Dent Mat J, 2007. 23(9): p. 1079-1085.
  33. DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe-Härteprüfung nach Vickers-Teil 1: Prüfverfahren Berlin: Beuth 2006.
  34. Ban S and Anusavice KJ. Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. J Dent Res, 1990. 69(12): p. 1791-1799.
  35. DIN EN ISO 7500-1:2018 Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung; Deutsche Fassung EN ISO 7500-1:2018 2018.
  36. DIN EN ISO 6872: 2019 Zahnheilkunde – Keramische Werkstoffe 2019.
  37. Guinea GV, Planas J and Elices M. Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1—Influence of experimental procedures. Mater Struct, 1992. 25(4): p. 212-218.
  38. Shetty DK, Rosenfield AR, McGuire P, Bansal GK and Duckworth WH. Biaxial flexure tests for ceramics. Am Ceram Soc Bull, 1980. 59(12): p. 1193-1197.
  39. Zeng K, Odén A and Rowcliffe D. Flexure tests on dental ceramics. Int J Prosthodont, 1996. 9(5).

40. DIN EN 843-1:2007 Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit 2007.
41. Gernet W. Zahnärztliche Prothetik. Vol. 5. 2007: Georg Thieme Verlag.
42. Bütikofer L, Stawarczyk B and Roos M. Two regression methods for estimation of a two-parameter Weibull distribution for reliability of dental materials. Dent Mat J, 2015. 31(2): p. e33-e50.
43. Brodbelt RHW, O'Brien WJ and Fan PL. Translucency of dental porcelains. J Dent Res, 1980. 59(1): p. 70-75.
44. Höland W, Schweiger M, Frank M and Rheinberger V. A comparison of the microstructure and properties of the IPS Empress® 2 and the IPS Empress® glass-ceramics. J Biomed Mater Res, 2000. 53(4): p. 297-303.
45. Zadeh PN, Lümke mann N, Sener B, Eichberger M and Stawarczyk B. Flexural strength, fracture toughness, and translucency of cubic/tetragonal zirconia materials. J Prosthet Dent, 2018. 120(6): p. 948-954.
46. Harada K, Raigrodski AJ, Chung K-H, Flinn BD, Dogan S and Mancl LA. A comparative evaluation of the translucency of zirconias and lithium disilicate for monolithic restorations. J Prosthet Dent, 2016. 116(2): p. 257-263.
47. Trushkowsky RD. Ceramic inlay fabrication with three-dimensional copy milling technology--Celay. Compend Contin Educ Dent, 1998. 19(11): p. 1077-80.
48. Lee Y-K. Translucency of human teeth and dental restorative materials and its clinical relevance. J Biomed Opt, 2015. 20(4): p. 045002.
49. Witzel T. Klinische Untersuchung computergestützter Zahnfarbbestimmung im Vergleich zu visueller Abmusterung durch das menschliche Auge. 2005.

50. Pflüger M. Entwicklung eines robusten Verfahrens zur Farbbestimmung von Zähnen auf Basis spektraler Daten. 2014.
51. Corbalan-Fuertes M, Millan Garcia-Verela MS and Yzuel MJ. Color pattern recognition with CIELAB coordinates. Opt En, 2002. 41.
52. Schanda J. Colorimetry: understanding the CIE system. 2007: John Wiley & Sons.
53. Seghi RR, Johnston WM and O'Brien WJ. Spectrophotometric analysis of color differences between porcelain systems. J Prosthet Dent, 1986. 56(1): p. 35-40.
54. DIN EN ISO 11664-4:2012-06 Farbmetrik - Teil 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Farbenraum 2012.
55. Luo MR, Cui G and Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur, 2001. 26(5): p. 340-350.
56. Bindl A, Lüthy H and Mörmann WH. Strength and fracture pattern of monolithic CAD/CAM-generated posterior crowns. Dent Mat J, 2006. 22(1): p. 29-36.
57. Stawarczyk B, Beuer F, Ender A, Roos M, Edelhoff D and Wimmer T. Influence of cementation and cement type on the fracture load testing methodology of anterior crowns made of different materials. Dent Mat J, 2013. 32(6): p. 888-895.
58. Liebermann A SB, Kieschnick A. Adhäsiv oder doch traditionell? 2017.
59. Liebermann A, Kieschnick A and Stawarczyk B. Selbstadhäsive Befestigungskomposite - ein aktueller Überblick. Quintessenz Zahntech, 2017. 43(11): p. 1494-1502.

60. Lohbauer U and Zorzin JJ. Silikatkeramiken und adhäsive Befestigungskonzepte. *Quintessenz Zahntech*, 2017. 44(11): p. 1474-1491.
61. Ferracane JL, Stansbury JW and Burke FJT. Self-adhesive resin cements—chemistry, properties and clinical considerations. *J Oral Rehabil*, 2011. 38(4): p. 295-314.
62. Stawarczyk B and Rosentritt M. Glossar der Verbundmechanismen und Oberflächenvorbehandlung. *Quintessenz Zahntech*, 2017. 43(11): p. 1405-1407.
63. Baader K, Hiller K-A, Buchalla W, Schmalz G and Federlin M. Self-adhesive Luting of Partial Ceramic Crowns: Selective Enamel Etching Leads to Higher Survival after 6.5 Years In Vivo. *J Adhes Dent*, 2016. 18(1).
64. Ramakrishnaiah R, Alkheraif AA, Divakar DD, Matinlinna JP and Vallittu PK. The effect of hydrofluoric acid etching duration on the surface micromorphology, roughness, and wettability of dental ceramics. *Int J Mol Sci*, 2016. 17(6): p. 822.
65. Yoshihara K, Nagaoka N, Sonoda A, Maruo Y, Makita Y, Okihara T, Irie M, Yoshida Y and Van Meerbeek B. Effectiveness and stability of silane coupling agent incorporated in ‘universal’ adhesives. *Dent Mat J*, 2016. 32(10): p. 1218-1225.
66. Özcan M and Vallittu PK. Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. *Dent Mat J*, 2003. 19(8): p. 725-731.
67. Shimada Y, Yamaguchi S and Tagami J. Micro-shear bond strength of dual-cured resin cement to glass ceramics. *Dent Mat J*, 2002. 18(5): p. 380-388.
68. Flinn BD, Raigrodski AJ, Mancl LA, Toivola R and Kuykendall T. Influence of aging on flexural strength of translucent zirconia for monolithic restorations. *J Prosthet Dent*, 2017. 117(2): p. 303-309.
69. Flinn BD, deGroot DA, Mancl LA and Raigrodski AJ. Accelerated aging characteristics of three yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline dental materials. *J Prosthet Dent*, 2012. 108(4): p. 223-230.

70. Dikicier S, Ayyildiz S, Ozen J and Sipahi C. Effect of varying core thicknesses and artificial aging on the color difference of different all-ceramic materials. *Acta Odontol Scand*, 2014. 72(8): p. 623-629.
71. Atay A, Oruç S, Ozen J and Sipahi C. Effect of accelerated aging on the color stability of feldspathic ceramic treated with various surface treatments. *Quintessence Int*, 2008. 39(7).
72. André M, Kou W, Sjögren G and Sundh A. Effects of pretreatments and hydrothermal aging on biaxial flexural strength of lithium di-silicate and Mg-PSZ ceramics. *Int J Dent*, 2016. 55: p. 25-32.
73. Jeong H-Y, Lee H-H and Choi Y-S. Mechanical properties of hybrid computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) materials after aging treatments. *Ceramics International*, 2018. 44(16): p. 19217-19226.
74. Lümke N and Stawarczyk B. Impact of hydrothermal aging on the light transmittance and flexural strength of colored yttria-stabilized zirconia materials of different formulations. *J Prosthet Dent*, 2020.
75. Volpato CAM, Monteiro S, de Andrada MC, Fredel MC and Petter CO. Optical influence of the type of illuminant, substrates and thickness of ceramic materials. *Dent Mater*, 2009. 25(1): p. 87-93.
76. Vichi A, Ferrari M and Davidson CL. Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. *J Prosthet Dent*, 2000. 83(4): p. 412-417.
77. Azer SS, Ayash GM, Johnston WM, Khalil MF and Rosenstiel SF. Effect of esthetic core shades on the final color of IPS Empress all-ceramic crowns. *J Prosthet Dent*, 2006. 96(6): p. 397-401.
78. Calgaro PA, Furuse AY, Correr GM, Ornaghi BP and Gonzaga CC. Post-cementation colorimetric evaluation of the interaction between the thickness of ceramic veneers and the shade of resin cement. *Am J Dent*, 2014. 27: p. 191-4.

79. Chang J, Da Silva JD, Sakai M, Kristiansen J and Ishikawa-Nagai S. The optical effect of composite luting cement on all ceramic crowns. *Int J Dent*, 2009. 37(12): p. 937-943.
80. Turgut S and Bagis B. Effect of resin cement and ceramic thickness on final color of laminate veneers: an in vitro study. *J Prosthet Dent*, 2013. 109(3): p. 179-186.
81. Chen X-D, Hong G, Xing W-Z and Wang Y-N. The influence of resin cements on the final color of ceramic veneers. *J Prosthodont Res*, 2015. 59(3): p. 172-177.
82. Dede DÖ, Ceylan G and Yilmaz B. Effect of brand and shade of resin cements on the final color of lithium disilicate ceramic. *J Prosthet Dent*, 2017. 117(4): p. 539-544.
83. Begum Z, Chheda P, Shruthi CS and Sonika R. Effect of ceramic thickness and luting agent shade on the color masking ability of laminate veneers. *J Indian Prosthodont Soc*, 2014. 14(1): p. 46-50.
84. de Azevedo Cubas GB, Camacho GB, Demarco FF and Pereira-Cenci T. The effect of luting agents and ceramic thickness on the color variation of different ceramics against a chromatic background. *Eur J Dent*, 2011. 5(3): p. 245.
85. DIN EN ISO 4049:2019 Zahnheilkunde - Polymerbasierende Restaurationswerkstoffe; Deutsche Fassung EN ISO 4049:2019 2019.
86. Pospiech P, Tinschert J and Raigrodski A. *Keramik-Vollkeramik. Ein Kompendium für die keramikgerechte Anwendung vollkeramischer Systeme in der Zahnmedizin*, 2004.
87. Stawarczyk B, Dinse L, Eichberger M, Jungbauer R and Liebermann A. Flexural strength, fracture toughness, three-body wear, and Martens parameters of pressable lithium-X-silicate ceramics. *Dent Mat J*, 2020. 36(3): p. 420-430.
88. Wang F, Yu T and Chen J. Biaxial flexural strength and translucent characteristics of dental lithium disilicate glass ceramics with different translucencies. *J Prosthodont Res*, 2019. 64(1): p. 71-77.

89. Muñoz EM, Longhini D, Antonio SG and Adabo GL. The effects of mechanical and hydrothermal aging on microstructure and biaxial flexural strength of an anterior and a posterior monolithic zirconia. *Int J Dent*, 2017. 63: p. 94-102.
90. Campos TMB, Ramos NC, Matos JDM, Thim GP, Souza ROA, Bottino MA, Valandro LF and Melo RM. Silica infiltration in partially stabilized zirconia: Effect of hydrothermal aging on mechanical properties. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020: p. 103774.
91. Kelch M, Schulz J, Edelhoff D, Sener B and Stawarczyk B. Impact of different pretreatments and aging procedures on the flexural strength and phase structure of zirconia ceramics. *Dent Mat J*, 2019. 35(10): p. 1439-1449.
92. Amarante JEV, Pereira MVS, De Souza GM, Alves MFRP, Simba BG and dos Santos C. Effect of hydrothermal aging on the properties of zirconia with different levels of translucency. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020: p. 103847.
93. Cokic SM, Vleugels J, Van Meerbeek B, Camargo B, Willems E, Li M and Zhang F. Mechanical properties, aging stability and translucency of speed-sintered zirconia for chairside restorations. *Dent Mat J*, 2020.
94. Camposilvan E, Leone R, Gremillard L, Sorrentino R, Zarone F, Ferrari M and Chevalier J. Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications. *Dent Mat J*, 2018. 34(6): p. 879-890.
95. Braziulis E. *Wissenschaftliche Dokumentation Variolink Esthetic*. 2018.
96. Kraushaar A. Die Anwendung moderner Farbabstandsformeln in der grafischen Industrie - Ergebnisse aus dem AiF Forschungsbericht. DwfG Meeting. München. Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V., 2008.
97. Vichi A, Carrabba M, Paravina R and Ferrari M. Translucency of ceramic materials for CEREC CAD/CAM system. *J Esthet Restor Dent*, 2014. 26(4): p. 224-231.



98. Xu B, Chen X, Li R, Wang Y and Li Q. Agreement of Try-In Pastes and the Corresponding Luting Composites on the Final Color of Ceramic Veneers. *J Prosthodont*, 2014. 23(4): p. 308-312.
99. Wang Y-N. The influence of resin cements on the final color of ceramic veneers. *J Prosthodont Res*, 2015. 59(3): p. 172-177.
100. Dede DÖ, Sahin O, Özdemir OS, Yilmaz B, Celik E and Koroğlu A. Influence of the color of composite resin foundation and luting cement on the final color of lithium disilicate ceramic systems. *J Prosthet Dent*, 2017. 117(1): p. 138-143.
101. Chaiyabutr Y, Kois JC, LeBeau D and Nunokawa G. Effect of abutment tooth color, cement color, and ceramic thickness on the resulting optical color of a CAD/CAM glass-ceramic lithium disilicate-reinforced crown. *J Prosthet Dent*, 2011. 105(2): p. 83-90.
102. Nakamura T, Saito O, Fuyikawa J and Ishigaki S. Influence of abutment substrate and ceramic thickness on the colour of heat-pressed ceramic crowns. *J Oral Rehabil*, 2002. 29(9): p. 805-809.
103. Castellanos M, Delgado AJ, Coelho Sinhoreti MA, Salles de Oliveira DCR, Abdulhameed N, Geraldeli S and Roulet J-F. Effect of Thickness of Ceramic Veneers on Color Stability and Bond Strength of Resin Luting Cements Containing Alternative Photoinitiators. *J Adhes Dent*, 2019. 21(1).

## 12 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Übersicht der verwendeten CAD/CAM-Silikatkeramiken. ....	34
<b>Tabelle 2:</b> Brennparameter ausgewählter Keramiken. ....	38
<b>Tabelle 3:</b> Deskriptive Statistiken – Martenshärte [ $\text{N/mm}^2$ ].....	56
<b>Tabelle 4:</b> Deskriptive Statistiken – Elastischer Eindringmodul [ $\text{kN/mm}^2$ ].....	57
<b>Tabelle 5:</b> Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [ $\text{MPa}$ ] .....	61
<b>Tabelle 6:</b> Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m).....	64
<b>Tabelle 7:</b> Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [ $\text{MPa}$ ].....	65
<b>Tabelle 8:</b> Deskriptive Statistiken – E Lab initial .....	67
<b>Tabelle 9:</b> Deskriptive Statistiken – Transluzenz [%] .....	70
<b>Tabelle 10:</b> Deskriptive Statistiken – L-Wert .....	73
<b>Tabelle 11:</b> Deskriptive Statistiken –Transluzenzänderung [%] und Farbänderung $\Delta E$ nach hydrothormaler Alterung (100 h).....	75
<b>Tabelle 12:</b> Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [ $\text{MPa}$ ] .....	77
<b>Tabelle 13:</b> Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [ $\text{MPa}$ ] .....	79
<b>Tabelle 14:</b> Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m).....	81
<b>Tabelle 15:</b> Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m).....	82
<b>Tabelle 16:</b> Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [ $\text{MPa}$ ].....	83
<b>Tabelle 17:</b> Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [ $\text{MPa}$ ].....	84
<b>Tabelle 18:</b> Deskriptive Statistiken – Biaxiale Biegefestigkeit [ $\text{MPa}$ ] .....	87
<b>Tabelle 19:</b> Deskriptive Statistiken – Weibull Modul (m).....	89
<b>Tabelle 20:</b> Deskriptive Statistiken – Charakteristische Festigkeit s [ $\text{MPa}$ ].....	91
<b>Tabelle 21:</b> Deskriptive Statistiken – Transluzenz [%] .....	95
<b>Tabelle 22:</b> Deskriptive Statistiken – L-Wert .....	100

**Tabelle 23:** Deskriptive Statistiken – Transluzenzänderung [%] und Farbänderung

$\Delta E$ nach Aufbringen des Befestigungskomposits .....	105
--	-----

## 13 Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Schematischer Versuchsaufbau der Härteprüfung nach Vickers .....	18
<b>Abbildung 2:</b> Schematischer Versuchsaufbau des Dreipunktbiegeversuchs.....	20
<b>Abbildung 3:</b> Schematischer Versuchsaufbau des Vierpunktbiegeversuchs.....	21
<b>Abbildung 4:</b> Vereinfachte Darstellung des CIELAB-Systems .....	26
<b>Abbildung 5:</b> CAD/CAM-Blöcke der verwendeten Silikatkeramiken. ....	35
<b>Abbildung 6:</b> Studiendesign.....	36
<b>Abbildung 7:</b> Links: Ceramill Motion 2 (Amann Girrbach, Pforzheim, Deutschland), Rechts: CAD/CAM-Blöcke positioniert im Silikatkeramikhalter.....	37
<b>Abbildung 8:</b> Links: Universalschneidemaschine (Secotom-50, Struers, Ballerup, Dänemark), Rechts: Zylinder vorbereitet für den Schneidevorgang.....	38
<b>Abbildung 9:</b> Zwischenschritte der Prüfkörperherstellung.....	39
<b>Abbildung 10:</b> Schleif- und Poliermaschine (Abramin, Struers).....	39
<b>Abbildung 11:</b> Digitale Messschraube (Mitutoyo, Andover, England).....	40
<b>Abbildung 12:</b> Trägerplatte mit den in Wachs befestigten Prüfkörpern.....	41
<b>Abbildung 13:</b> Universalprüfmaschine ZHU zur Messung der Martenshärte. (ZHU 0,2, ZwickRoell, Ulm, Deutschland).....	42
<b>Abbildung 14:</b> Messung der Martenshärte.....	43
<b>Abbildung 15:</b> Schematischer Versuchsaufbau: Messung der biaxialen Biegefestigkeit (Abbildung modifiziert nach [36]). ....	44
<b>Abbildung 16:</b> Links → Universalprüfmaschine (1445 Zwick/Roell, ZwickRoell), Rechts → Prüfkörper unmittelbar vor der Messung.....	45
<b>Abbildung 17:</b> Spektrophotometer (Lambda 35, PerkinElmer LAS, Waltham, USA). ....	48
<b>Abbildung 18:</b> Studiendesign.....	49
<b>Abbildung 19:</b> Vorrichtung zum Aufbringen des Befestigungskomposits.....	50
<b>Abbildung 20:</b> Studiendesign.....	52

<b>Abbildung 21:</b> Martenshärte und elastischer Eindringmodul in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	58
<b>Abbildung 22:</b> Elastischer Eindringmodul in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.....	59
<b>Abbildung 23:</b> Biaxiale Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.....	62
<b>Abbildung 24:</b> Initialer Farbwert in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	66
<b>Abbildung 25:</b> Transluzenz in Abhängigkeit von der Transluzenzstufe. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	69
<b>Abbildung 26:</b> Transluzenz in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	69
<b>Abbildung 27:</b> L-Wert in Abhängigkeit von der hydrothermalen Alterung. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	72
<b>Abbildung 28:</b> Biaxiale Biegefestigkeit initial und nach hydrothermalen Alterung (100 h). Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	76
<b>Abbildung 29:</b> Biaxiale Biegefestigkeit initial und nach Aufbringen des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken in Tabellen und Abbildungen erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	80

<b>Abbildung 30:</b> Transluzenz. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.....	94
<b>Abbildung 31:</b> L-Wert. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch.....	99
<b>Abbildung 32:</b> Transluzenzänderung in Abhängigkeit von der Farbe des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	104
<b>Abbildung 33:</b> Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbe des Befestigungskomposits. Die Anordnung der Silikatkeramiken erfolgte nach Materialgruppen und innerhalb dieser Gruppen alphabetisch. ....	104

## 14 Danksagung

Mein herzlichster Dank gilt Frau Prof. Dr. rer. biol. hum. Dipl. Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc. und Frau PD Dr. med. dent. Anja Liebermann, M.Sc. Ihr seid zwischenmenschlich und fachlich nicht zu übertreffen. Ich wünschte ich hätte schon bei meiner ersten Doktorarbeit so eine exzellente Betreuung genießen dürfen.

Außerdem möchte ich beim Forschungsteam der Werkstoffkunde der Zahnärztlichen Prothetik der Ludwig-Maximilians-Universität München bedanken. Besonderer Dank geht an Marlis Eichberger, Dr. rer. biol. hum. Nina Lümke, M.Sc., Lisa-Marie Schönhoff M.Sc., Alexander Prechtel und Eva Jerman, M.Sc. für ihre stetige Hilfsbereitschaft und die zahlreichen Ratschläge.

Zuletzt möchte ich meiner Mutter, meinem Freund Jonas und meiner Freundin Hanna danken.

## 15 Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift mit dem Titel

**Mechanische und optische Eigenschaften von CAD/CAM-Silikatkeramiken vor und nach hydrothermalen Alterung sowie vor und nach Aufbringen eines konventionellen Befestigungskomposits**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Düsseldorf, den 8. April

Alicia Mandl

---

Ort, Datum

Unterschrift